交流电机的使用维护和修理

JIAOLIU DIANJI DE SHIYONG WEIHU HE XIULI

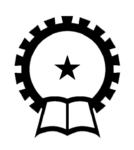
王占元　王宁　编著





交流电机的使用、维护和修理

王占元　王　宁　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书着重介绍了单/三相异步电动机、串励电动机和同步电机等常见各种交流电机的基本原理和结构特点；介绍了它们各自的使用、选型、维护、改造和修理方法。实用性强，阅读后便能快速上手。

本书不仅适合维修电工和电机使用的专业技术人员，也适合广大初学者，还可以作为专业培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

交流电机的使用、维护和修理/王占元，王宁编著.
—北京：机械工业出版社，2010.9
ISBN 978-7-111-31815-6

Ⅰ.①交… Ⅱ.①王…②王… Ⅲ.①交流电机-使用②交流电机-维修 Ⅳ.①TM340.7

中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第175875号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：林春泉 责任编辑：吕 潇
版式设计：霍永明 责任校对：程俊巧
封面设计：路恩中 责任印制：杨 曦
北京京丰印刷厂印刷
2010年11月第1版·第1次印刷
184mm×260mm·17.5印张·432千字
0 001—3 000册
标准书号：ISBN 978-7-111-31815-6
定价：39.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者服务部：(010)68993821

网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com

前言

交流电机，包括单相和三相异步电动机、单相串励电动机、同步电动机和同步发电机，以及同步调相机等。

在我国经济建设飞速发展的形势下，随着交流电能的普及使用，各种交流电机在城乡各行业中已成为主要的动力和能源设备：单相和三相异步电动机的使用率约占电力拖动系统的95%以上，各种家用电器、电动工具、办公自动化系统等几乎全部由单相交流电动机来拖动；同步电动机在一些特种机械设备中也在使用；中小型交流发电机也成为了为应急而准备的必要设备。

为了节约设备资源，充分发挥交流电机的作用，按照科学发展观，我们对它必须学会规范地选择和使用、科学地维护和保养以及不断地改造和修复。编写本书就是希望广大维修电工和电机的使用人员从中得到启发和帮助，以实现上述之目的。

本书对各类交流电机分别予以介绍，主要内容包括：

1）从使用角度出发，阐明它们各自的原理特点、结构特点、运行规律及特性，重点是它们的外部特性。

2）介绍发电机的电压稳定和负载调节方法，以及各种电动机如何起动、反转、调速、制动等方面的特点、方法和典型的控制电路。

3）介绍各种交流电机的选型、使用和运行维护等方法，分析电机在运行中常见的故障及处理方法，给出典型的修复、改造等措施。

4）介绍部分特种、专用电机的特点以及既典型又实用的新技术，供读者在实践中参考。

本书的特点是实用性强、通俗易懂、深入浅出、看后即懂、看后即用。本书不仅适合专业电气技术人员参考，也适合广大初学者参考，还可作为专业培训教材。

为了深刻理解交流电机的原理和特性，在此，先将几个基本定律介绍给读者：

1）法拉第电磁感应定律：当导体和磁场发生相对切割运动或者导体线圈包围的磁通发生改变时，导体内均产生感应电动势。

2）毕奥-萨伐尔电磁力定律：载有电流的导体处在磁场中的适当位置时，导体将受到电磁力的作用。

3）能量守恒定律：能量只能从一种形式转换为另一种形式，它既不能被创造也不能被消灭。

4）导体电流产生磁场：载有电流的导体，周围必然伴随着磁场产生。且磁场的强弱和方向随着电流的大小和方向改变而变化。

读者参阅此书时，建议要着重理解各种交流电机的原理本质，熟悉其特点和特性，掌握选型、使用、维护和修复的方法，懂得或学会改造电机的先进技术。这样才能为解决实际问题打下良好的基础。

本书在编写过程中参考了部分同行老师的书籍和其他相关资料，对我们写书有很多的帮助和启发，借此机会特向这些老师表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不当之处，恳切希望同行及广大读者指正。

编　者

2010 年 10 月

目　录

第一章　三相异步电动机概述

三相异步电动机又称为感应电动机。它是将三相交流电能转换为机械能输出的一种动力设备。在交流电机中，它被应用的最多。虽然这种电动机简单耐用，但是维修量仍然很大，因此使用和维护人员首先要清楚和掌握它的基本情况和特点，才能为正确地选型使用和修理打下基础。

本章介绍的内容有三相异步电动机的原理和结构特点；三相异步电动机的主要电磁关系和运行特性；三相异步电动机正常工作的条件；三相异步电动机的分类、主要技术数据的含义和作用等基本情况。

第一节　三相异步电动机的原理和特点

三相异步电动机的旋转主要是靠电和磁相互转换和相互作用而实现的。

一、三相异步电动机的旋转原理

现以两极三相异步电动机为例说明。三相异步电动机的结构是由定子和转子两大部分组成的，其原理如图 1-1 所示。

定子是固定不动的，它上面的三相定子绕组 U_1U_2；V_1V_2；W_1W_2 被施加三相交流电压后，三相定子绕组内就会有三相正弦交流电流通过。电流的表达式为

$$\left.\begin{aligned} i_U &= \sqrt{2}I\sin\omega t \\ i_N &= \sqrt{2}I\sin(\omega t-120°) \\ i_W &= \sqrt{2}I\sin(\omega t+120°) \end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}1)$$

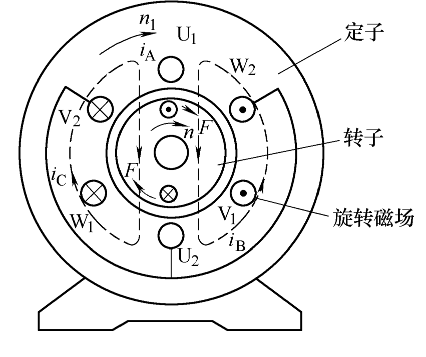


图 1-1　三相异步电动机原理图

这时，三相电流即产生磁场，三相电流的变化波形及形成的磁场如图 1-2 所示。合成的磁场具有固定的极数（本例中极数为 2），并且沿电动机内圆周方向以一定的速度 n_1 做不停的旋转，通常称之为旋转磁场。这个旋转磁场和转子上的绕组导体发生相对切割运动，使已经短接的转子绕组产生感应电动势及感应电流。转子上的这些载流导体与旋转磁场相互作用产生电磁力 F，这个力对转子轴形成了电磁转矩 T，驱使转子沿着旋转磁场转动的方向旋转起来。这就是三相异步电动机的基本旋转原理。

二、旋转磁场形成的条件和特点

电动机的定子固定不动，而内部产生的磁场却是旋转的，它必须具备两个必要条件：

1）定子内圆的槽中必须嵌放三相对称的定子绕组。所谓三相对称的定子绕组，就是三相绕组的尺寸、形状、匝数完全相同，并在定子圆周上的空间位置各相要互差 120°的电度

角[⊖]。这个条件在制造或修理电动机中，嵌放三相绕组的时候必须得到保证。

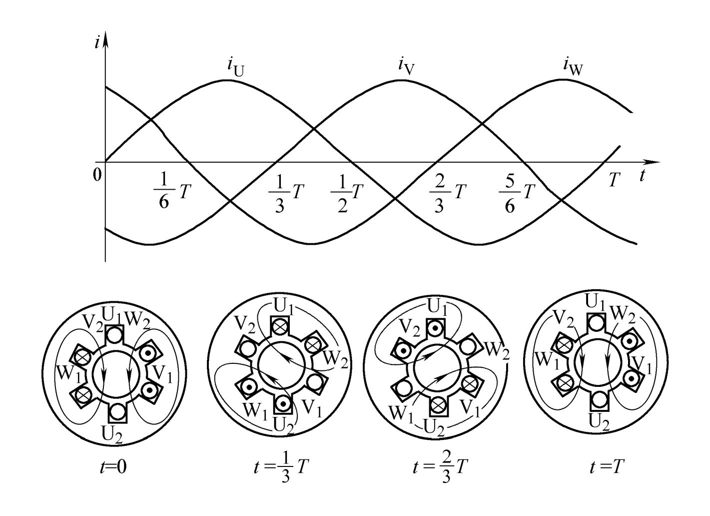


图 1-2　三相电流的变化波形及形成的磁场

2）定子绕组内必须有三相对称的正弦交流电流通过（见图 1-2），这个条件，在使用电动机时必须予以保证。即电动机三相定子绕组接好线后，在其端部要施加一个三相对称的正弦交流电压。

三相异步电动机内形成的旋转磁场有 3 个主要特点：

1）旋转磁场磁极数 $2p$（p 为磁极对数）的多少由定子三相绕组的结构来决定，在绕组嵌放时予以确定（后文中将专门介绍）。

2）旋转磁场的旋转方向由通入三相绕组的电流相序来确定。例如：上例中定子的三相绕组 U_1U_2；V_1V_2；W_1W_2 依次分别流入式 1-1 所示的三相交流电流 i_U、i_V、i_W 时，旋转磁场是顺时针方向旋转，若将它们流入的电流相序改为 i_U、i_W、i_V 后，形成的旋转磁场则变为逆时针方向旋转。就是说，旋转磁场旋转方向的规律总是从超前相绕组转向滞后相绕组的位置。

3）旋转磁场的转速 n_1，通常又称同步转速，其大小由下式来决定，即

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \tag{1-2}$$

式中　n_1——同步转速（r/min）；

f_1——交流电流的频率（Hz）；

p——电动机内形成的磁极对数。

国产异步电动机使用的三相交流电流的频率 $f_1 = 50\text{Hz}$，不同极数的电动机，其旋转磁场的同步转速 n_1 见表 1-1。

⊖　空间电角度是指以电动机内形成每对磁极所占的圆周空间位置为 360°而划分的圆周空间角度。

表 1-1　三相异步电动机不同极数下的转速（$f_1 = 50\text{Hz}$）

电动机的极数	2	4	6	8	10	12
磁极对数 p	1	2	3	4	5	6
同步转速 n_1(r/min)	3000	1500	1000	750	600	500
额定转速 n/(r/min)	2880	1440	960	720	580	480

三、异步电动机转子旋转的条件和特点

因为转子是因载流导体和磁场相互作用产生电磁转矩而旋转的，因此转子旋转的基本条件是：

1）电动机内旋转磁场的形成和存在。否则转子导体上不能产生要求的感应电动势，更谈不上形成载流导体。

2）转子绕组必须是自行闭合回路。否则导体上只有感应电动势而不会有感应电流。在实际使用绕线转子异步电动机时要特别注意。

此外，当转子沿旋转磁场转动的方向转起来以后，它的转速 n 始终必须低于同步转速 n_1，这是转子维持长期稳定运转的必要条件。只有转子转速低于同步转速，两者存在一定转速差时，转子才能有导体切割磁场产生的感应电流，进而产生电磁转矩来维持旋转。异步电动机的名称也由此而得。

三相异步电动机转子旋转的特点有两个：

1）根据电磁感应定律和电磁力定律，转子旋转的方向一直和旋转磁场旋转的方向一致。

根据这一特点，实践中若要使电动机反转，只要调换三相电源中的任意两相进线，使三相绕组电流相序改变，从而改变旋转磁场的转向，即可达到电动机反转的目的。

2）转子的转速低于同步转速，即 $n < n_1$，$n_1 - n$ 称为转速差。

通常，工程上用转差率 s 表达三相异步电动机的转速。s 的定义为

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{1-3}$$

s 是一个没有单位的量值。因为对一台三相异步电动机而言，一般它的极数（$2p$）和通入它的电源频率 f_1 均是固定的。所以 n_1 是一定的，那么转差率 s 的大小就可以反映出电动机的转速。例如：$n = 0$ 时，$s = 1$；$n = n_1$ 时，$s = 0$；n 从 0 变化到 n_1，s 则由 1 变到 0。转差率 s 是三相异步电动机的一个重要参数。

正常运行的三相异步电动机，转子转速接近于同步转速，因此转差率 s 很小。额定运行时的电动机转差率 s_N 一般为 0.02 ~ 0.06。

第二节　三相异步电动机的结构特点和分类

目前，由于被拖动的机械负载多样化，以及工作环境和场合不同，实际生产和使用的三相异步电动机种类繁多，结构也有差别，但是，组成电动机主要部件的特点、材料及要求还是类同的。本节主要将三相异步电动机的共同结构特点和要求予以介绍，并介绍一下国产三相异步电动机的产品系列和分类情况。

一、三相异步电动机的结构特点和要求

在此，以普通用途的三相异步电动机为例，介绍它们共同的结构特点。

图 1-3 所示为笼型三相异步电动机的结构示意图。

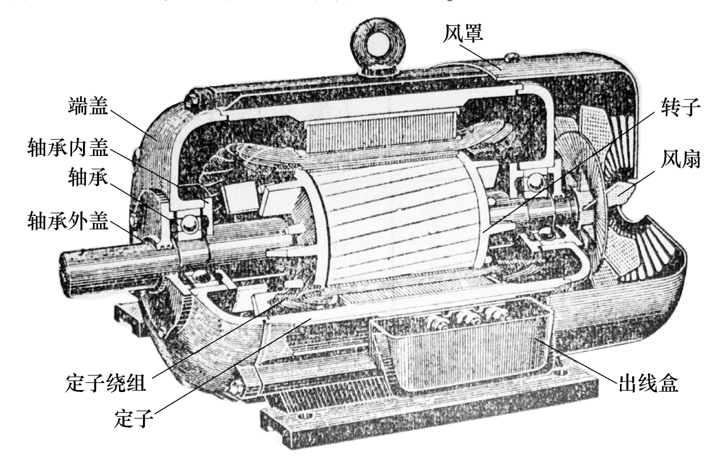


图 1-3　笼型三相异步电动机的结构示意图

图 1-4 所示为绕线型三相异步电动机的结构示图。

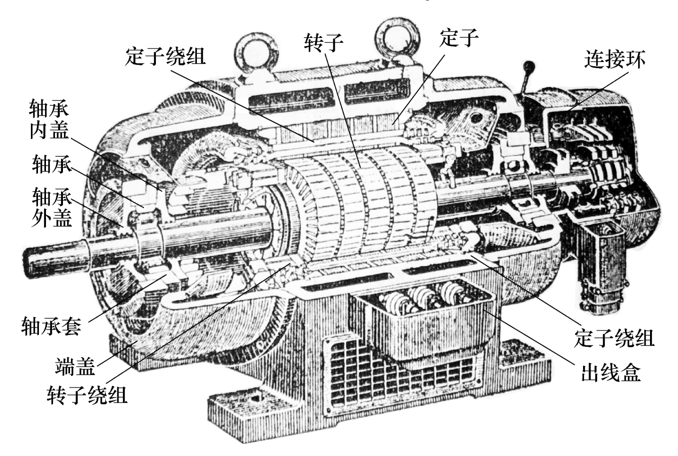


图 1-4　绕线转子三相异步电动机的结构示意图

异步电动机的主要结构部件及特点分述如下。

1. 机座

机座的主要作用是支撑定子铁心，固定端盖，并通过底脚将整台电动机安装固定。对全封闭电动机，机座表面又是主要散热面。机座的主要特点有：

1）为了承受各种作用力而不变形，它必须有足够的刚度，所以，中小型电动机的机座选用铸铁铸成，大型电动机用钢板焊接而成。

2）对外界必须有一定的防护能力。一般普通电动机的机座采用开启式、防护式、封闭式等不同的型式，特殊场合的还采用特种防护型式，例如：防爆式，潜水（油）式，防化学腐蚀式等。

3）有足够的散热能力。例如封闭式机座有散热筋，增加散热面积，防护式机座下面留有通风孔等。

2. 定、转子铁心

电动机的定、转子铁心是旋转磁场的主要通过路径，为了使磁路中的磁场较强且减少损耗，所以铁心的构成有如下特点：

1）铁心选用厚度为0.5mm的电工钢片经冲制成形后叠压而成，中小型电动机通常选含硅量较低的冷轧无取向硅钢片或热轧硅钢片，也可选无硅低碳电工钢片。大型电动机一般选用含硅量较高的冷轧无取向硅钢片或热轧硅钢片。

2）冲片平整，厚度均匀，无毛刺和锈垢，片间保持一定的压力，不允许松动。

3）定子铁心和机座之间要过盈配合，转子铁心也要紧固在轴上。

4）铁心的槽内要光滑整齐，无突出片或其他污垢。

3. 定子绕组

定子绕组是电动机接受交流电能的电路部分，而且它还要产生一个理想的旋转磁场。因此，它用高强度漆包圆形或扁形铜（或铝）线绕制成规定的三相多匝线圈，以一定的方式嵌放在定子铁心槽内（详见第四章）。各相绕组之间，绕组与铁心之间都用绝缘材料隔开。三相绕组的出线端接在接线盒处引出，按一定的接法去接电源。常见的有两种接法：星形接法（Y联结）和三角形接法（△联结），如图1-5所示。

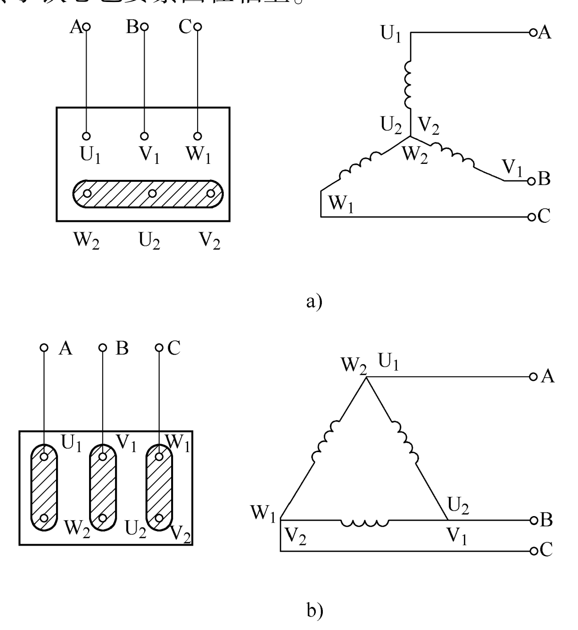


图1-5　定子绕组出线端的接线方法
a）星形联结　b）三角形联结

4. 转子绕组

转子绕组是产生感应电流和电磁转矩的重要部件，考虑到提高电动机的性能和工艺上的简单，它分两种结构型式，各有特点。

一种结构型式是笼型绕组。它在铁心的每个槽内只放一根导体，用两个端环分别将所有槽的导体端部短接起来，绕组形如笼子，故称笼型绕组，如图1-6所示。中小型普通电动机笼型绕组选用的材料一般为铸铝。

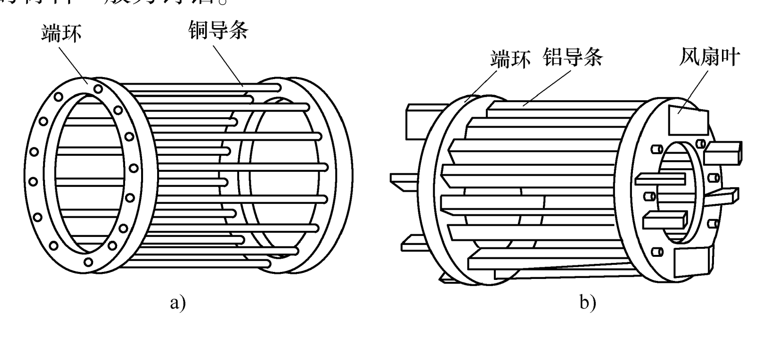


图1-6　笼型转子绕组
a）铜笼　b）铝笼

另一种结构为绕线型。它和定子绕组相似，在转子铁心槽内嵌放三相对称绕组。其出线端一般采用星形接法，三相引出线分别接在轴的3个彼此绝缘的集电环上，再通过电刷引出，串接附加电阻形成回路。如图1-7所示。

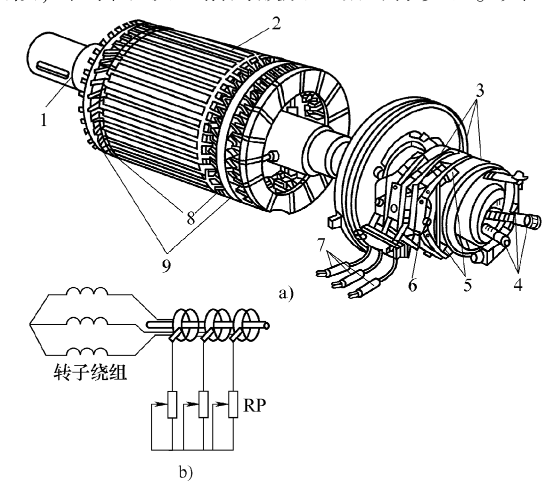


图1-7 绕线式转子绕组接线示意图

1—转轴 2—转子铁心 3—集电环 4—转子绕组出线头 5—电刷 6—刷架 7—电刷外接线 8—三相转子绕组 9—镀锌钢丝箍

5. 电动机的绝缘

电动机的定子以及绕线式转子中都放置必要的绝缘。这些绝缘主要包括绕组的对地绝缘（槽绝缘）、绕组的匝间绝缘、端部的相间绝缘、槽内的层间绝缘以及针对槽楔和绕组的绝缘等。因为这些绝缘是电动机中最薄弱的关键环节，所以对其不仅要求具备足够的绝缘强度，而且要有一定的耐热性能，同时还要有一定的机械强度和耐潮性。表1-2为三相异步电动机常用的绝缘电磁线和绝缘材料。

表1-2 三相异步电动机常用的电磁线和绝缘材料

耐热等级	电磁线[1]	槽绝缘材料	绕包绝缘材料[2]	槽楔、垫条接线板等绝缘件	漆管、管套[3]	绑扎带（转子）	引接线
E	缩醛漆包线 QQ-2，QQB，QQL-2，QQLB	聚酯薄膜绝缘纸复合箔 6520 聚酯薄膜玻璃漆布复合箔 6530	油性玻璃漆布 2412	酚醛层压纸板 3020～3023 竹（经处理） 酚醛塑料 4010，4013	油性玻璃漆管 2714	聚酯绑扎带	橡皮绝缘丁腈护套引接线 JBQ（500V，1140V）
B	聚酯漆包线 QZ-2，QZB，QZL-2，QZLB 双玻璃丝包线 SBEC，SBECB，SBELCB 双玻璃丝包聚酯漆包线 QZS-BECB	聚酯薄膜玻璃漆布复合箔 6530 聚酯薄膜聚酯纤维纸复合箔 DMD DMDM	沥青醇酸玻璃漆布 2430，醇酸玻璃漆布 2432，环氧玻璃漆布 2433 环氧玻璃粉云母带 5438-1 钛改性环氧玻璃粉云母带 9541-1	酚醛层压玻璃布板 3230 苯胺酚醛层压玻璃布板 3231 酚醛玻璃纤维塑料 4330	醇酸玻璃漆管 2730	聚酯绑扎带	氯磺化聚乙烯橡皮绝缘引接线 JBYH（500V，1140V，6000V） 6kV 橡皮绝缘氯丁护套引接线 JBHF
F	聚酯亚胺漆包线 QZY-2，QZYB 双玻璃丝包聚酯亚胺漆包线 QZYSBEFB	聚酯薄膜芳香族聚酰胺纤维纸复合箔 NMN（或聚酯薄膜芳香族聚砜酰胺纤维纸复合箔 SMS，聚酯薄膜噁二唑纤维纸复合箔 OMO）	聚萘酯薄膜，其他材料同 H 级	环氧酚醛层压玻璃布板 3240	同 H 级	环氧绑扎带	乙丙橡胶绝缘引接线 JFEH（6000V 及以下）

（续）

耐热等级	电磁线[1]	槽绝缘材料	绕包绝缘材料[2]	槽楔、垫条接线板等绝缘件	漆管、管套[3]	绑扎带（转子）	引接线
H	聚酰胺酰亚胺漆包线 QXY-2, QXYB 聚酰亚胺漆包线 QY-2, QYB 硅有机漆双玻璃丝包线 SBEG, SBEGB 聚酰亚胺薄膜绕包线	聚酰亚胺薄膜芳香族聚酰胺纤维纸复合箔 NHN,（或聚酰亚胺薄膜芳香族聚砜酰胺纤维纸复合箔 SMS, 聚酯薄膜噁二唑纤维纸复合箔 OMO）	有机硅玻璃漆布 2450 聚酰亚胺玻璃漆布 2560 聚酰亚胺薄膜 有机硅玻璃粉云母带 5450-1	有机硅环氧层压玻璃布板 3250 有机硅层压玻璃布板 3251 聚二苯醚层压玻璃布板 聚胺酰亚胺层压玻璃布板	有机硅玻璃漆管 2750 硅橡胶玻璃丝管 2751	聚胺-酰亚胺绑扎带	硅橡胶绝缘引接线 JHS（500V） 聚四氟乙烯引接线(500V)

① 根据需要某些型号可选用自粘性电磁线。
② 漆布、薄膜均包括带状材料，玻璃丝带可用于各耐热等级。
③ 玻璃纤维定纹套管可用于各耐热等级。

6. 定转子之间的气隙

定转子之间的气隙是三相异步电动机结构中的重要组成部分。它是为了保证转子在定子内自由转动而设置的。但是这个气隙不能过大，否则会产生同样大小的旋转磁场，需要的定子励磁电流就会过大，这个电流主要是无功电流，不仅影响电动机的功率输出，也使电动机的功率因数降低。因此，电动机在保证转子运转安全的情况下，气隙应尽量减小。一般气隙长度约为 0.2 ~2mm。

二、国产异步电动机的产品系列和分类

鉴于三相异步电动机产量大，品种多，使用广的特点，为了便于生产、选型和维修，我国已实行电动机的标准化、系列化、通用化，形成了统一的系列产品。各种电动机用不同的型号来表示，参看附录 A-1。

国产异步电动机产品共分为三大系列：

1）产量最多，使用最广的一般普通用途三相异步电动机系列，称为基本系列。例如，原来使用的老产品防护式 J2 系列，封闭式 JO2 系列，高速 JK 系列等，现在已被淘汰，被新产品 Y、YR、YK 等系列产品所替代。近年来，又研制出 YX 及 Y2、Y3 等更新的高效电动机。

2）为适应拖动系统和环境条件的某些需求，在基本系列的基础上作部分改变而出现的系列产品，称为派生系列。如冶金用起重 YZ 系列，防爆安全型 YA 系列等电动机。

3）为适应某些机械的特殊要求而设计制造的特殊结构系列电动机，称为专用系列。如井用潜水 YQS 系列电动机，屏蔽式 YP 系列电机等。

在各系列中，根据电动机的大小、防护型式、安装条件、绝缘等级和工作定额等又分若干品种和规格。表 1-3 列出三相异步电动机几种主要的分类方式，以区别各种不同的产品。

表 1-3 三相异步电动机的主要分类

分类方式	类　别
转子绕组型式	笼型;绕线型
电动机尺寸	大型　中型　小型
中心高/mm	>630　355~630　80~355
定子铁心外径 D_1/mm	>1000　500~1000　120~500
防护型式	开启式(IP11),防护式(IP22),(IP23),封闭式(IP44)
冷却方式	自冷式,自扇冷式,他扇冷式,管道通风式
安装结构型式	卧式,立式,带底脚,带凸缘
绝缘等级	E 级,B 级,F 级,H 级
工作定额	连续,断续,短时

第三节　三相异步电动机的主要电磁关系和特性

本节主要介绍三相异步电动机在运行中电压、电流、电动势、磁通等物理量的相互影响关系，以及它的机械特性。这对后面分析、使用和维修三相异步电动机有着一定的指导意义。

一、电动机运行中的主要电磁关系

理论分析和实践证明，三相异步电动机在运行中有以下主要电磁关系：

1. 定子侧

当在三相定子绕组上施加三相交流电压后，电动机内侧产生 p 对磁极的旋转磁场，用 Φ 表示每极下的磁通量。这个旋转磁场旋转时，对不动的三相定子绕组，也有相对切割运动。这样，定子每相绕组中就产生一个感应电动势——定子相电动势。它和电压、磁通等保持下面的关系

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 K_{W1} N_1 \Phi \tag{1-4}$$

式中　U_1——定子每相绕组施加的电压有效值（V）；

E_1——定子每相电动势的有效值（V）；

f_1——定子相电动势频率（Hz），与电源频率相同；

Φ——电动机内每极的磁通量（Wb）；

K_{W1}——定子绕组系数，与绕组结构有关；

N_1——定子每相绕组的串联线圈匝数。

上式告诉我们两点：第一，对已经制成的三相异步电动机，其定子电动势 E_1 和电动机内每极下的磁通 Φ 的大小主要决定于外施电压 U_1，若外施电压 U_1 为额定值一定，则电动机内产生的磁通 Φ 基本上不会变化。第二，若电压 U_1 为额定值要求一定，使用时，将频率 f_1 改变，或者修理时将定子绕组的匝数 $K_{W1}N_1$ 改变，则电动机内产生的磁通 Φ 要随之改变。

此外，三相异步电动机空载运行时，它的定子绕组向电网吸取一个电流（每相电流有效值记为 I_0），称其为空载电流。这个电流 I_0 主要作用是建立磁动势 F_0 后而产生旋转磁场

(Φ)。因为 $U_1=U_N$ 一定，Φ 一定，那么 F_0 也一定，而 F_0 的大小由下式确定，即

$$F_0=K_1\frac{N_1K_{W1}}{p}I_0 \tag{1-5}$$

式中　K_1——与定子绕组结构有关的常数。

通常，三相异步电动机的空载电流 $I_0=(20\%\sim50\%)I_{1N}$，功率小的电动机 I_0 稍有偏大。

2. 转子侧

三相异步电动机运行时，转子的转速 n 总是低于旋转磁场的转速 n_1，旋转磁场是以相对转差速度 $\Delta n=n_1-n$ 切割转子导体的。故转子产生的感应电动势 E_{2P}，及其频率 f_2，转子电流 I_{2s}、转子漏磁电抗 x_{2s}、转子功率因数 $\cos\varphi_2$ 均随 n 或 Δn 的改变而变化。可有下面式子确定：

$$\left.\begin{aligned}&f_2=f_1s\\&E_{2s}=sE_{20}=s\cdot4.44f_1N_2K_{W2}\Phi\\&X_{2s}=sX_{20}=s\cdot2\pi f_1L_2\\&I_{2s}=\frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2+X_{2s}^2}}=\frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2+(sX_{20})^2}}\\&\cos\varphi_2=\frac{R_2}{\sqrt{R_2^2+X_{2s}^2}}=\frac{R_2}{\sqrt{R_2^2+(sX_{20})^2}}\end{aligned}\right\} \tag{1-6}$$

式中　$s=\dfrac{n_1-n}{n_1}$——转差率；

E_{20}——转子不动时（$n=0$）的转子感应电动势；

X_{20}——转子不动时的漏电抗；

L_2——转子漏抗电感。

上述转子各量均随其转速而改变，是三相异步电动机的一个重要特点。

3. 定、转子之间

当三相异步电动机的定子绕组接通电源后，不仅定子电流产生旋转磁场，转子绕组内的感应电流也产生了一个旋转磁场。实践证明，无论转子转速是多少，这两个磁场的极数、转向和转速完全相同，它们在电动机内空间位置虽然不同，但相对静止。电动机内气隙中的磁场实际上是由定、转子两个旋转磁场合成的。

当电动机空载时，$n\approx n_1$，$I_{2P}=0$，这时气隙的磁通 Φ 仅由定子空载电流 $\dot{I}_0$ 所建立的空载磁动势 $\dot{F}_0$ 所产生。当电动机在其他情况下运行时，$n<n_1$，$I_{2P}\neq0$，这时，气隙的磁通 Φ 则由定子电流 $\dot{I}_1$ 所建立的定子磁动势 $\dot{F}_1$ 和转子电流 $\dot{I}_2$ 所建立的转子磁动势 $\dot{F}_2$ 共同产生的。前面已谈过，无论电动机在什么情况下运行，只要定子电压 U_1 一定，每极的磁通 Φ 是基本不变的。这样，则有

$$\dot{F}_1+\dot{F}_2=\dot{F}_0 \tag{1-7}$$

式（1-7）称为异步电动机的磁动势平衡方程式。它是异步电动机定、转子之间保持平衡的重要电磁关系。

由式（1-7）可得：

$$\dot{F}_1=\dot{F}_0+(-\dot{F}_2)$$

上式也可理解为，三相异步电动机在额定电压 U_1 一定的情况下运行，由于它每极下的磁通 Φ 要求基本一定，所以定子电流 $\dot{I}_1$ 产生的定子磁动势 $\dot{F}_1$，一部分 $\dot{F}_0$ 用来产生磁通 Φ，而另一部分 $-\dot{F}_2$ 用来抵消转子磁动势的影响。这样可以进一步得出，虽然电动机内定、转子之间没有直接的电气联系，但是当转子电流变化（比如因转速下降而增加）时，定子电流也必然随之改变（定子电流也要增加）。这点对使用电动机时分析问题提供了方便。

二、三相异步电动机的电磁转矩

三相异步电动机转子上的载流导体和电动机内的磁场相互作用，产生了电磁转矩，用 T 来表示。电磁转矩 T 是电动机能否拖动机械负载正常运行的重要力能指标，故要求电动机的电磁转矩必须足够大。

通过理论推导和实践证明，电动机产生的电磁转矩表达式有下列几种形式。

电磁表达式：

$$T = C_T \Phi I_2 \cos\varphi_2 \tag{1-8}$$

式中　C_T——电动机结构有关的常数；

Φ——每极磁通量；

$I_2\cos\varphi_2$——转子电流的有功分量。

参数表达式：

$$T = \frac{K_1}{f_1} \cdot \frac{sR_2U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \tag{1-9}$$

式中　K_1——电动机结构有关的比例常数；

R_2——转子导体电阻；

X_{20}——转子不动时导体的电抗值；

U_1——电源相电压；

f_1——电源相电压频率；

s——转差率。

实用表达式：

$$T = T_{max}\frac{2}{\dfrac{s_m}{s} + \dfrac{s}{s_m}} \tag{1-10}$$

式中　T_{max}——电动机产生的电磁转矩最大值；

s_m——产生最大转矩时的转差率（临界转差率）；

s——转差率。

从以上各种形式的电磁转矩表达式看到，影响电动机产生电磁转矩大小的主要因素有电源电压 U_1 的大小（$T \propto U_1^2$），电动机内每极下的磁通 Φ 的多少，转子电流有功分量 $I_2\cos\varphi_2$ 的大小等。一台电动机在不同的转速下（n 不同，s 不同），它产生的电磁转矩也不同。这些在使用三相异步电动机时均要引起注意和重视。

三、三相异步电动机的机械特性

三相异步电动机在其额定电压 U_N 和额定频率 f_N 情况下，它所产生的电磁转矩 T 与其转速 n 的关系，即 $T=f(n)$ 或 $T=f(s)$，称之为机械特性。根据式（1-9）或式（1-10）即可描绘出某台电动机的机械特性曲线，如图（1-8）所示。

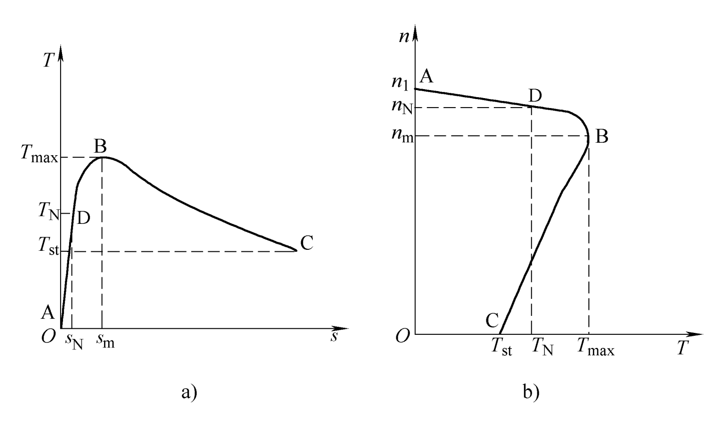


图 1-8　三相异步电动机的机械特性曲线

a）转矩特性　b）机械特性

从三相异步电动机的机械特性曲线中可知：

1）三相异步电动机带着机械负载只能在 $s=0\sim s_m$ 之间（或者 $n=n_1\sim n_m$）才能稳定运行。在 $s=s_m\sim 1$（或 $n=n_m\sim 0$）之间的转速段，电动机的运行是不稳定的。所以三相异步电动机的转速 n 通常较接近 n_1。

2）额定工作点，即额定转速 n_N（s_N）下的额定转矩 T_N 点（图 1-8 中 D 点）。这是衡量三相异步电动机带负载运行能力的重要指标。通常可以通过下式近似计算出。

$$s_N=\frac{n_1-n_N}{n_1} \tag{1-11}$$

$$T_N=9550\frac{P_N}{n_N}$$

式中　P_N——电动机的额定功率（kW）；

n_N——额定转速（r/min）；

T_N——额定转矩（N·m）；

s_N——额定转差率。

3）最大转矩 T_{max} 和过载能力 K_m。T_{max} 是三相异步电动机产生的电磁转矩最大值，在机械特性曲线中的 B 点（见图 1-8）。T_{max} 反映了三相异步电动机的过载能力。而产生 T_{max} 的转差率 s_m（n_m）因为是电动机稳定运行区和不稳定运行区的分界点，故 s_m 称为临界转差率。

T_{max} 和 s_m 的计算公式是

$$s_m=\frac{R_2}{x_{20}}$$

$$T_{max}=\frac{k_1}{f_1}\cdot\frac{u_1^2}{2x_{20}} \tag{1-12}$$

实际工程中，常用最大转矩倍数 K_m 来反映三相异步电动机的过载能力。即

$$K_m=\frac{T_{max}}{T_N} \tag{1-13}$$

K_m 也是三相异步电动机重要技术指标。一般电动机的 $K_m=1.6\sim2.5$，Y 系列小型异步电动机的 $K_m=2.2\sim2.4$，专用起重与冶金用异步电动机 $K_m=3.3\sim3.4$ 等。

4）起动转矩 T_{st}和起动能力。T_{st}是电动机起动瞬时（$n=0$）所产生的电磁转矩。见图1-8曲线上的C点。起动转矩 T_{st}的大小反映了电动机的起动能力，它也是三相异步电动机的一个重要技术指标。工程上用起动转矩倍数 K_{st}表示：

$$K_{st}=\frac{T_{St}}{T_N} \tag{1-14}$$

为保证三相异步电动机带一般负载能正常起动，要求 $K_{st}>0.8$。Y系列小型异步电动机的 $K_{st}=1.7\sim2.2$；高起动转矩异步电动机的 $K_{st}=2.2\sim2.8$。

以上介绍的是三相异步电动机的固有机械特性。在实际工程使用时，改变电动机本身的某些参数或者施加给电动机的条件发生变化，它的机械特性也会改变。改变后的机械特性称为人为机械特性。最具有实际意义的有两种：

1）改变转子电阻值人为机械特性。改变绕线转子电动机的转子回路中的串联电阻阻值，或者改变笼型绕组转子导体的材料，均使电阻 R_2 增大，根据式（1-12）可知，电动机产生的最大转矩 T_{max}不变。而产生最大转矩的临界转差率 s_m 正比于 R_2 而增大，所以电动机的机械特性就要变化，如图1-9a所示。后面将要介绍利用上述原理改善电动机的起动性能或进行速度的调节。

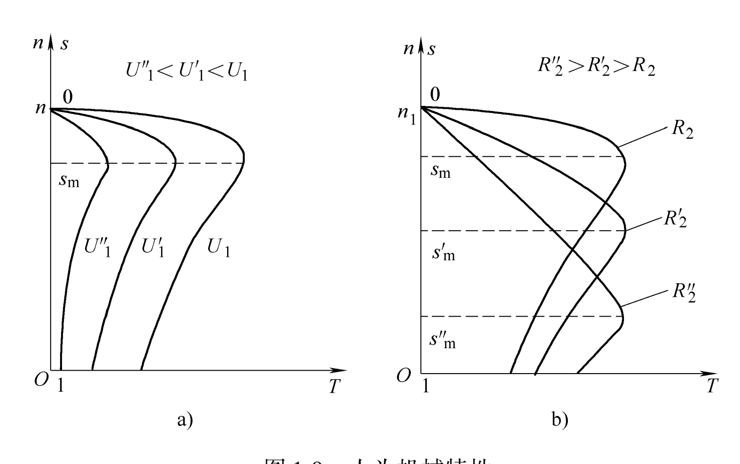


图1-9　人为机械特性

a）变压机械特性　b）转子串电阻机械特性

2）改变电源电压而得的人为机械特性。若加在定子上的电源电压 U_1 低于额定值，根据 $T\propto U_1^2$ 可知，电磁转矩则要平方下降，但从式（1-12）可知，临界转差率不变，故得到降压后的人为机械特性，如图1-9b所示。

第四节　三相异步电动机的铭牌及技术数据

电动机的外壳上有一块铭牌。上面有该台电动机使用时要用的技术内容和数据，见表1-4。另外，在电机手册或产品目录中也标注了每种电动机的一些技术数据。这些技术数据反映了各种电动机的种类、大小、使用条件和特点。本节着重介绍这些技术内容和数据的含义，读者掌握了这些，今后才能正确地选型和使用三相异步电动机。

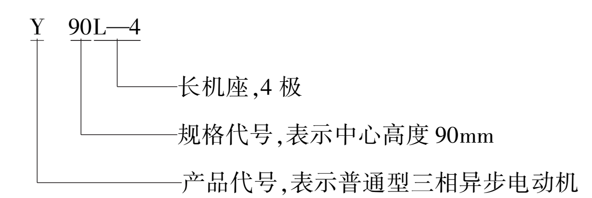
表 1-4　三相异步电动机的铭牌

三相异步电动机					
型号	Y90L-4	电压	380V	接法	Y
容量	1.5kW	电流	3.7A	工作方式	连续
转速	1400r/min	功率因数	0.79	温升	75℃
频率	50Hz	绝缘等级	B	出厂年月	*年*月
电机厂　产品编号：054048　重量：公斤					

一、铭牌上的主要技术内容和数据

1. 型号

它表示异步电动机的品种代号，由产品代号和规格代号组成。各种新旧产品代号可见附录 A-1 或有关电机手册。现举一例说明型号的含义。



Y 系列电动机的型号表示，在同一中心高度规格中，机座号又分为短、中、长三种，分别用国际通用符号 S、M、L 表示；铁心长度一般也分为两种，用数字代号 1、2 依次表示。中心高度均符合国家统一技术标准规定。

2. 额定功率（P_N）

它表示电动机在额定运行情况下，转轴上允许输出的机械功率。单位为 W 或 kW。有的电动机用马力表示功率单位（1 马力 =0.736kW）。

3. 额定电压（U_N）

它表示电动机在额定运行情况下，定子三相绕组输入的线电压，单位为 V。如果标有两个电压数据，则表示定子绕组在两种不同接法时的线电压。如：220/380V，表示定子绕组为△形时，输入时的电源线电压应为220V；若其为Y形，输入时的电源线电压则为380V。

4. 额定频率（f_N）

它表示电动机所接交流电源的频率。单位为 Hz。我国电源的标准频率为50Hz。有的国家（如美国等国家）采用60Hz 为电源的标准频率。

5. 接法

电动机在额定电源电压下工作，定子三相绕组采用的连接方法。一般有星形（Y）和三角形（△）两种接法（见图 1-5）。多速电动机视设计和使用的要求而有各种接法。例如：2/4 极双速电动机的接法为YY/△。使用时不能搞错。

6. 额定电流（I_N）

它表示电动机在额定运行情况下，定子三相绕组的线电流。单位为 A。如果标有两个电流数据，则表示定子绕组在两种不同接法时的线电流。

7. 额定功率因数（$\cos\varphi_N$）

因为三相异步电动机是属电感性的负载，定子相电流比相电压滞后一个 φ 角，$\cos\varphi<1$。

而 $\cos\varphi_N$ 是电动机在额定情况下的功率因数值。

8. 绝缘等级

它表示电动机所用绝缘材料允许极限温度的等级。等级分类见表 1-2。例如，Y 系列电动机采用的是 B 级绝缘，它的允许极限温度为 130℃；过去使用的老产品 J2、JO2 系列电动机采用的是 E 级绝缘，它的允许极限温度为 120℃。

9. 定额

它是按照技术标准的要求，对电动机按规定的全部电量和机械量数值所运行的持续时间和顺序。按照运行的持续时间及顺序，电动机分连续、短时和断续三种定额。全部定额的运行称为额定运行。

连续定额的电动机，是按照规定的全部电量和机械量的数值，不受时间限制而连续运行的电动机；短时定额的电动机是按照规定的全部电量和机械量的数值，在规定时间限值内（由实际冷却状态开始）运行的电动机，标准的持续时间限值分 10min、30min、60min 或 90min 四种；断续定额的电动机是按照上述的数值，长期运行于一系列完全相同周期的电动机。周期的时间规定为 10min，包括一个额定负载时间和一个停止时间。额定负载时间与整个周期之比称为电动机的负载持续率，用百分数表示。标准的负载持续率有 15%、25%、40%、60% 四种。无其他说明时，25% 为基准负载持续率。电动机的负载持续率常用 FC 表示。

有的电动机用工作制或工作方式表示定额。

10. 额定转速（n_N）

它表示三相异步电动机在额定运行情况下的运转速度。单位为 r/min。

11. 标准编号

它表示制造厂在设计这台电动机时依据的标准。例如 GB 为国家标准；JB 为机械行业标准。符号后面的数字是该标准的编号。

二、手册中的技术数据

在有关电机手册或产品手册中也可查到某种规格电动机的一些技术数据，以供选型、购置或修理电动机时参考。

在技术数据中，除了上述的型号、额定功率、额定转速、额定电压和额定功率因数等以外，还有以下几个：

1. 额定效率（η_N）

它表示该种电动机在额定运行情况下，它输出的额定机械功率与输入的电功率比值。即 $\eta_N = \dfrac{P_N}{P_1}$。

2. 过载能力倍数（K_m 或 λ_M）

指该种电动机产生的最大转矩与其额定转矩的比值。即 $K_m = \dfrac{T_{max}}{T_N}$。

3. 起动能力倍数（K_{st}）

指该种电动机起动瞬时的转矩与其额定转矩的比值。即 $K_{st} = \dfrac{T_{st}}{T_N}$。

4. 起动电流倍数（K_I）

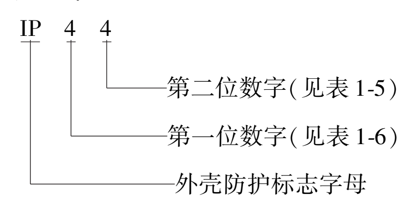
指该种电动机起动瞬时定子线电流与其额定电流的比值。即 $K_I = \frac{I_{st}}{T_N}$。

对特种电动机还可查到其特殊技术内容和数据。

此外，为选型和使用的需要，在铭牌或手册中还标注了以下三个主要技术内容：

1）三相异步电动机外壳的防护型式和防护等级。对普通场合使用的异步电动机，防护型式有两种：一种是防止固体异物进入电动机的内部及防止人体触及电动机内部带电或运动部分的防护，另一种是防止水进入电动机内部达到有害程度的防护。以上两种防护均用防护等级的字母和数字标志。

举例说明防护等级的标志方法：



通过表1-5和表1-6可知，以上标志表明此电动机能防护大于1mm的固体异物进入机内，且同时能防止任何方向的溅水对电动机的有害影响。

表1-5　外壳防固体进入内部的防护等级表

防护等级	简　　称	定　　义
0	无防护	没有专门的防护
1	防护大于50mm的固体	能防止直径大于50mm的固体异物进入壳内 能防止人体的某一大面积部分(如手)偶然或意外地触及壳内带电或运动部分，但不能防止有意识地接近这些部分
2	防护大于12mm的固体	能防止直径大于12mm的固体异物进入壳内 能防止手指触及壳内带电或运动部分
3	防护大于2.5mm的固体	能防止直径大于2.5mm的固体异物进入壳内 能防止厚度(或直径)大于2.5mm的工具、金属线等触及壳内带电或运动部分
4	防护大于1mm的固体	能防止直径大于1mm的固体异物进入壳内 能防止厚度(或直径)大于1mm的工具,金属线等触及壳内带电或运动部分
5	防尘	能防止灰尘进入达到影响产品正常运行的程度 安全防止触及壳内带电或运动部分
6	尘密	完全防止灰尘进入壳内 完全防止触及壳内带电或运动部分

表1-6　外壳防水进入内部的防护等级表

防护等级	简　　称	定　　义
0	无防护	没有专门的防护
1	防滴	垂直的滴水应不能直接进入产品内部
2	15°防滴	与铅垂线成15°角范围内的滴水,应不能直接进入产品内部

（续）

防护等级	简　　称	定　　义
3	防淋水	与铅垂线成60°角范围内的淋水，应不能直接进入产品内部
4	防溅	任何方向的溅水对产品应无有害的影响
5	防喷水	任何方向的喷水对产品应无有害的影响
6	防海浪或强力喷水	猛烈的海浪或强力喷水对产品应无有害的影响
7	浸水	产品在规定的压力和时间下浸在水中，进水量应无有害的影响
8	潜水	产品在规定的压力下长时间浸在水中，进水量应无有害的影响

2）异步电动机的安装结构型式及其代号　根据在机械上的安装情况不同，电动机有不同的安装结构型式。基本结构型式的分类见表1-7。同时，电动机的轴伸也有不同的型号，见表1-8。

表1-7　基本结构型式分类表

序号	基本结构型式	分类代号	典型示意图
1	有两个（或一个）端盖式轴承，带底脚或具有附加减速装置的电动机	A1	(A101)
2	带底脚，端盖上带凸缘的电动机	A2	(A201)
3	无底脚，端盖上带凸缘的电动机	A3	(A301)
4	无底脚，机座上带凸缘的电动机	A4	(A401)
5	装入式或附装式电动机	A5	(A501)

（续）

序号	基本结构型式	分类代号	典型示意图
6	端盖式轴承和座式轴承的电动机	A6	(A602)
7	座式轴承的电动机	A7	(A722)

表 1-8　电动机轴伸型号

轴伸数量	轴 伸 型 式	附加代号
1	圆柱形轴伸	（省略）
	圆锥形轴伸	Z
	带凸缘轴伸	T
2	圆柱形轴伸	YY
	圆锥形轴伸	ZZ
	带凸缘轴伸	TT
	一个带凸缘轴伸和一个圆锥形轴伸	TZ
	一个圆柱形轴伸和一个带凸缘轴伸	YT
	一个圆柱形轴伸和一个圆锥形轴伸	YZ

在手册中也用字母、数字及附加代号来表示。例如：

“A101Z”表示电动机有两个端盖式轴承，带底脚，卧式安装，有一个圆锥形轴伸。

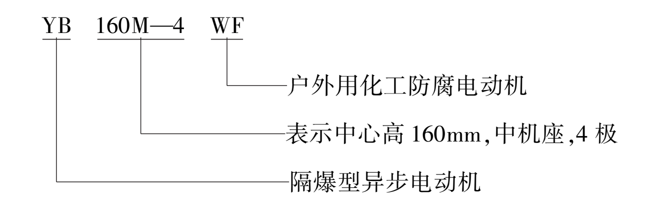
“A301”表示电动机无底脚，端盖上带凸缘，立式或卧式安装，有一个圆柱形轴伸。

3）特殊环境结构及代号。为适应各种特殊的工作环境，电动机也分不同的结构和工艺处理。在产品型号上用不同的代号表示。供用户选择。各种特殊环境条件的代号见表 1-9。

表 1-9　特殊环境代号

含　　义	代　　号	含　　义	代　　号
高原用	G	热带用	T
船（海）用	H	温热带用	TH
户外用	W	干带用	TA
化工防腐用	F		

例如：



第五节　影响电动机运行的因素及运行要求

三相异步电动机工作性能的好坏，常用一些技术指标来衡量，这些技术指标有电动机的效率 η、功率因数 $\cos\varphi$、转速 n、电磁转矩 T（最大转矩倍数和起动转矩倍数）和定子电流 I_1 等。电动机在实际运行时，常常由于负载、电源及环境条件的影响，使上述的技术指标有不同的变化。了解和掌握主要技术指标的变化和规律，熟悉电动机正常运行的要求和条件，才能使电动机工作在最佳状态。

本节主要就上述问题分别予以讨论，供读者参考。

一、负载对电动机运行的影响

实际使用电动机时若所带的机械负载改变，那么，电动机运行的 η、n、$\cos\varphi$、T 及 I_1 均会受到影响发生改变，其规律在工程上称为运行特性。图 1-10 所示为负载对三相异步电动机影响的运行特性曲线。

1. 转速特性 $n=f(P_2)$

电动机空载时，$P_2=0$，n 几乎等于 n_1，当机械负载增加时，转子受到阻力，n 下降，但根据机械特性可知，转速 n 下降得并不多。例如，两极三相异步电动机空载时：$n\approx$ 3000r/min，负载增加到额定时，$n_N\approx$2880r/min；4 极电动机空载时：$n\approx$1500r/min，额定负载时 $n_N\approx$1440r/min 等。$n=f(P_2)$变化曲线见图 1-10，呈硬特性。

2. 效率特性 $\eta=f(P_2)$

三相异步电动机的效率为 $\eta=\dfrac{I_2}{P_1}$，其中 P_1 为输入的三相电功率，P_2 为输出的机械功率。电动机效率的高低主要取决于电动机内损耗的大小。损耗越大，效率越低。而三相异步电动机内有三种损耗：第一是铜损耗，即电流在定、转子通过时，在其电阻上的损耗，它随电动机电流而变化，又称可变损耗；第二是铁心中的磁滞涡流损耗，因它与电动机的磁场有关，而在电压一定时，磁场不变，故又称为不变损耗；第三是机械摩擦产生的损耗，因为电动机的转速变化不大，机械损耗也为不变损耗。

空载时，$P_2=0$，$\eta=0$，负载开始增加时，电动机的机械损耗和铁心损耗不变，而输出功率不大，所以效率不高，当负载增至额定功率的 75% ~100% 时，可变损耗增加到和不变损耗相同，此时效率 η 最高；若负载再增加，会使可变损耗增加很多，造成电动机效率 η 反而下降。$\eta=f(P_2)$的变化曲线如图 1-10 所示。可以看出，若使电动机的效率最高，电动机所带的负载最好接近或等于额定负载值。Y 系列 11kW 以下的电动机 $\eta_N=70.5\%\sim88\%$，11 ~90kW 的 $\eta_N=88\%\sim93.5\%$。

3. 功率因数特性 $\cos\varphi=f(P_2)$

三相异步电动机空载运行时，定子仅有以建立磁场为主要目的的空载电流 I_0，属于无功

分量，此时 $\cos\varphi<0.2$，很低。负载增加时，定、转子电流的有功分量增大，而磁场及其 I_0 分量基本不变，故 $\cos\varphi$ 增大。当负载增加到一定程度（实践证明即为接近或等于额定值）后，转子的漏电抗增加，使无功分量及功率因数反而下降。$\cos\varphi=f(P_2)$的曲线如图 1-10 所示。额定负载时，Y 系列电动机，2 极的电动机 $\cos\varphi_n=0.84\sim0.89$，4 极电动机 $\cos\varphi_n=0.76\sim0.89$。

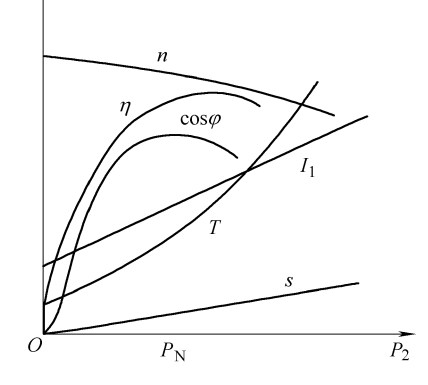


图 1-10　负载对三相异步电动机影响的运行特性曲线

4. 定子电流特性 $I_1=f(P_2)$

电动机空载时，定子上仅为空载电流 I_0。中小型电动机的 $I_0=$（30%～50%）I_N，当电动机的负载 P_2 增加，转子及定子电流增大，$I_1=f(P_2)$为一上升的曲线（见图 1-10）。

5. 转矩特性 $T=f(P_2)$

三相异步电动机空载运行时，$P_2=0$，转子只克服电动机本身的空载阻转矩 T_0 以接近 n_1 的转速旋转。当所带的负载增加后，电动机的转速略有下降，此时转子电势及电流必然上升，电磁力及转矩也随之增加。当电磁转矩 T 和外加负载转矩 T_2 及空载转矩 T_0 之和达到新的平衡（即 $T=T_2+T_0$）后，电动机就又会在新转速下稳定运行。由于转速下降不多，故 $T=f(P_2)$曲线接近直线略有上弯（见图 1-10）。

从以上各种特性曲线中可知，我们在使用三相异步电动机时，应当尽可能让它接近额定负载运行，这样，它的效率及功率因数最高，且转速变化不大，负载过少，虽然能运行，但不经济；负载过多，易使定子电流过大，使电动机过热，寿命降低。

二、电源对三相异步电动机的影响

电源电压的高低，对称程度以及频率的波动，对运行中的三相异步电动机均有一定的影响。这里分别介绍并提出要求及措施。

首先，电源电压值若是低于额定值，那么电动机产生的电磁转矩 T 正比于 U_1^2 而下降，会导致其起动能力和过载能力降低。

如果电动机是轻载运行（≤40%P_N），那么降低电压运行，磁场减小，其空载电流 I_0 及铁心损耗的减少，还能使其功率因数及效率有所提高，若机械负载能正常运行，这是一种节能的好方式。

可是，如果电动机带着重载运行，一旦电源电压较低，会使电动机的起动困难。即使电动机勉强起动起来，其运行的转速也会因转矩减小而下降，且定、转子电流会因此而增加，造成效率降低，电动机过热，对电动机的运行不利。

若电源电压高于电动机的额定使用值，虽然电动机的转矩能增大，但是由于电动机内的磁场增强，容易导致电动机铁心饱和，空载电流 I_0 急剧增加，铁损增多。这种情况的发生，不仅使电动机的功率因数下降，更严重的是电动机很易过热，甚至烧坏。所以这种过电压运行是不允许的。

为此，按国家有关技术标准规定，电源电压实际值与额定值的偏差不允许超过 ±5%，这是保证三相异步电动机满负载正常运行的重要条件。

电源电压不对称，主要指三相电压大小不一样，这种情况时有发生。比如，电网上有较

大的单相负荷工作（电焊机、单相电炉等），电源出现故障（比如高压侧单相断线），电源电压不对称，会使电动机产生的磁场发生畸变，产生的电磁转矩下降，定、转子的电流额外增加，并且三相电流不平衡。这样一来，电动机的运行效率不仅下降，电动机还要过热，出现较大的噪声。在实际生产中，当电源电压出现严重不对称时，要禁止三相异步电动机工作。

根据有关技术标准规定，三相电压中，任一相电压不允许超过三相电压平均值的5%，这是保证三相异步电动机正常工作运行的又一重要条件。

我国的三相交流电源标准频率$f=50\text{Hz}$，国产三相异步电动机以此频率为其工作时的额定值。

通常，三相电力电网的频率波动很小，对三相异步电动机不会产生影响，但是有时部分进口的60Hz电动机误接在50Hz的电网上时，某些独立的小型发电站（机），由于负载的增加，原动机的转速下降，会引起发出的电源频率严重下降，这些情况对电动机的运行就会产生不良影响。

电源频率的下降，而电源电压不变，则根据$U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 K_{W1} N_1 \Phi$，电动机内的磁场会增强。这会使电动机铁心磁场饱和，空载电流急剧增大，造成铁心损耗增大。电动机所带的负载即使不超过额定值，电动机也会因电流过大和过热不能运行，这是不允许的。

为此，国家技术标准又规定，使用的电源频率与电动机的额定频率偏差不允许超过±1%。这也是保证三相异步电动机正常运行的重要条件之一。

三、工作环境对三相异步电动机的影响

电动机的工作环境，主要指电动机工作地点的环境温度、海拔和工作场所的条件等。

限制三相异步电动机运行的重要指标之一就是电动机的温升。三相异步电动机的温升（在电动机铭牌也有标注）是指：带额定负载，在规定的环境温度下（技术标准规定环境温度为40℃）运行，电动机绕组温度允许高出环境温度的数值。即

允许温升＝允许的绕组温度－环境规定的温度

也就是说，三相异步电动机运行时，电动机绕组的温度不允许超过上述的允许温度。

但是电动机实际工作地点的环境温度与规定值（40℃）一般有差别。如果实际环境温度超过规定值，电动机仍带额定负载运行，那么电动机绕组温度一定会超过允许值，这会使电动机的绝缘部件过热加速老化，降低电动机的寿命。

遇到上述情况，电动机只有减少负载才能长期运行。一般经验为，环境温度每升高5℃，负载必须减少5%左右。

若环境温度低于规定值，电动机适当超过额定负载运行也是允许的。

根据我国的地理情况，国产三相异步电动机适合在海拔低于1000m的地点工作。若电动机的工作地点高于海拔1000m以后，由于大气压力的减小，电动机的散热能力降低，容易使电动机的温度超过允许值，对其运行不利。

在实际中，对一般电动机，如果使用地点的海拔超过1000m（但不超过4000m）时，其温度限度应按试验地点与使用地点的海拔差进行校对，校正率为每100m差0.5℃。

电动机工作场所的湿度、灰尘的浓度、腐蚀性气体或易燃易爆气体的浓度也是影响三相异步电动机正常工作的重要因素。工作场所的条件恶劣将使电动机的绝缘强度迅速下降、机件锈蚀损坏或引起燃烧和爆炸事故等。

因此，保持工作场所的清洁是使三相异步电动机能正常工作的前提。另外，应选择不同防护能力的电动机（如防护式、封闭式、防腐式、防爆式等），以适合不同场合下工作。

综上所述，我们的电动机使用维护人员一定要掌握负载电源和工作环境对三相异步电动机影响的规律，把握好电动机正常工作的条件，这样才能使三相异步电动机处于最佳运行状态。

第二章　三相异步电动机的选型和使用

合理地选择和正确地使用电动机，是充分发挥电动机作用，使其既经济又安全工作的有效措施。本章主要介绍三相异步电动机的选型和各种使用方法。

第一节　三相异步电动机的选型和安装检查

不同特性的机械负载需要选择不同的三相异步电动机来拖动，这就需要机械负载和电动机合理的配套，换句话说，一台机械必须选择与之匹配的电动机，选型的合理与否是机械设备正常运行的重要因素。

一、三相异步电动机选型的原则和内容

选择异步电动机的原则是：

1）机械特性方面，所选电动机要能够完全满足生产机械的要求。如电动机要满足机械所需要的速度稳定性或调节性，或满足机械起动及制动的时间限制等。

2）所选电动机在工作过程中，要能充分地被利用，达到标准所规定的输出功率及温升。

3）所选电动机的结构要适合周围环境的条件。如电动机对工作环境的温度、湿度、灰尘度，对有害气体的侵蚀，对易燃、易爆等危险因素是否有防御能力。

根据上述原则，选择电动机时，主要考虑以下内容：

1）容量的选择；

2）转速的选择；

3）电压的选择；

4）类型的选择；

5）结构型式的选择。

其中，对异步电动机的容量选择尤为关键，这是因为容量若选小了，不仅不能保证生产机械的正常工作，生产效率降低，而且电动机会因过载而超过允许温度，降低电动机的寿命。如果电动机容量选择大了，不仅增加了设备的投资，电动机的效率和功率因数还要降低，很不经济。另外，要选择到合适的容量，考虑的因素必须全面。不仅涉及到机械负载的大小，工作状态及特征，还要将环境温度及散热情况一起综合分析。因此，容量的大小是电动机选型首先要考虑的内容。

二、异步电动机的选型

1. 异步电动机容量的选择

确定异步电动机的容量常用两种方法，一种是分析法，另一种是类比法。

（1）分析法

分析法是按机械负载功率及生产机械的工作情况，预先选一台电动机。然后按电动机的实际负载情况进行发热，过载能力及起动能力的校验来确定其容量。

首先，要知道机械负载的运行情况。它可分为连续、短时和断续运行三种。选择的异步电动机工作定额要与其尽量相对应。

以连续运行的负载为例，确定电动机容量的过程如下：若负载大小为恒定值时，因为电动机带恒定负载长期运行，它所达到的稳定温度如果等于电动机所允许的最高温升，电动机才算被利用得最充分，而电动机的额定功率又是按其所允许的最高温升条件，长期工作输出的功率值所规定的。所以，所选的电动机容量等于或稍大于负载的功率即可。而负载功率可根据负载转矩及转速算出。式（2-1）为连续运行时，恒定负载下电动机容量的计算公式：

$$P_N \geqslant \frac{T_L n}{9550} \tag{2-1}$$

式中　P_N——所选电动机的额定功率（kW）；

T_L——电动机轴上所带的负载转矩（N·m）；

n——电动机轴上的额定转速（r/min）。

从产品目录中可查出所选电动机的过载能力和起动能力，校核是否满足机械负载的需要。如果此项不能满足，还要选取容量更大一些的电动机才行。

在生产实际中，恒定负载较少，大多数电动机的负载是按一定的规律周期性地变化着，如图2-1所示。

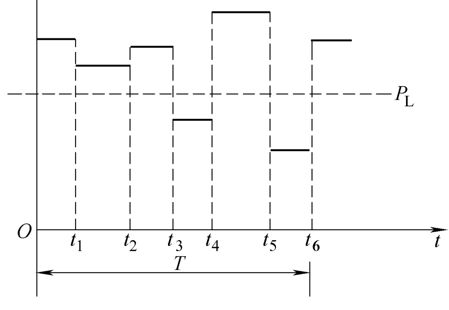


图2-1　连续变化负载下的电动机负载图

对于在变化负载下长期工作的电动机，必须满足以下条件：电动机能满足最大负载的要求；在周期性变化负载下工作时，电动机的温升应不超过允许值。由此出发，通常先按过载条件初选一台电动机，然后按发热条件进行校验。

按照过载条件，初选的电动机额定功率 P_N 应满足

$$P_N > \frac{P_{max}}{K_m} \tag{2-2}$$

式中　P_{max}——在工作循环中，电动机输出的最大功率（kW）；

K_m——初选电动机的过载倍数。

对初选的电动机进行校验，因为电动机的额定功率是指拖动恒定负载长期运行来说的。所以，在变化负载下工作时，按发热条件先找出它所相当的恒定负载，即等值负载 P_L，若 $P_N \geqslant P_L$，校验即为合格。

对异步电动机，工作时发热的多少主要取决于它的损耗。当电动机的负载变化时，主要是它的铜损耗随负载而变化。异步电动机工作时，它的铜损耗与电流的平方成正比，所以电动机的发热与电流的平方成正比。而电动机的电流又与其输出的功率成正比，所以其等值功率 P_L 可近似按下式确定，即

$$P_L = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \cdots\cdots}{T}} \tag{2-3}$$

对于工作中很少起动，制动，不调速，负载变化时其转速基本不变的异步电动机，即按式（2-3）求出等值功率 P_L，与初选的电动机额定功率进行比较，是否合格。如不合格，还

要选较大容量的电动机。

由于异步电动机的起动转矩较低，所以还要校验起动转矩。即所选电动机的起动转矩T_{st}必须大于负载的阻转矩T_L。T_{st}可由产品目录中查取。

此外，如果实际工作环境的温度与标准环境温度（技术标准为40℃）有差别，对电动机所选的容量还要适当调整。一般，环境温度每相差5℃，电动机容量要调整5%左右。

选择断续工作的机械负载的电动机容量时，还要考虑到，当负载持续率FC%不等于电动机标准持续率FC_S%时，对电动机所选容量也要修正。修正后的容量P'_N为

$$P'_N = P_N \sqrt{\frac{FC\%}{FC_S\%}}$$

同理，对短时工作方式的负载，若负载实际工作时间与电动机标准工作时间不一致时，对电动机所选的容量也要修正。修正后的容量P_N为

$$P'_N = \sqrt{\frac{t_g}{t_{gS}}} \cdot P_N$$

式中　t_g——负载实际工作时间；

t_{gS}——电动机的标准工作时间。

（2）类比法

类比法是通过调查研究了长期运行的同类生产机械配套的电动机容量，然后对机械的主要参数、工作条件进行类比，得出统计分析公式，来确定电动机的容量。例如：我国机床制造厂对不同的机床采用的主电动机容量统计分析式为

车床：$P_N \geqslant 36.5D^{1.54}$(kW)；

式中：D为车床加工工件的最大直径（m）。

摇臂钻床：$P_N \geqslant 0.0646D^{1.19}$(kW)；

式中：D为最大钻孔直径（m）。

卧式镗床：$P_N \geqslant 0.004D^{1.7}$(kW)；

式中：D为镗杆直径（mm）。

龙门铣床：$P_N \geqslant B^{1.16}/1.66$(kW)；

式中：B为工作台的宽度（mm）。

有关统计分析式可查阅《机床手册》或其他有关资料即可得到。类比法比较简单，适合于有同类机械的电动机选择。

2. 异步电动机转速的选择

异步电动机的转速，应从技术及经济指标全面考虑，合理选择。

1）对于不需要调速的高转速或中转速的机械，如水泵、鼓风机等，一般要选相应转速的异步电动机，直接与生产机械相连接。

2）对于不需要调速的低速机械，一般选用适当转速的异步电动机，通过减速机构与生产机械相连接，或选择专用减速电动机。对大功率的机械，所选电动机的转速不宜过高，以免增加减速机构的制造和维修成本。

3）对于调速的机械，当调速方法确定后，异步电动机的最高转速应与生产机械的最高转速相适应。

3. 异步电动机电压的选择

所选择的异步电动机，定子的额定电压一定要和使用电源的线电压相等。一般我国的三相交流电源的线电压标准值为380V、6kV、国产异步电动机也是按此标准设计的，所以通常问题不大。但是，在一些特殊电源的条件下，或使用特种电动机时，一定注意工作电压。

4. 异步电动机类型的选择

1）不需要调速，且无特殊要求的机械，应首先考虑选择普通笼型异步电动机。需要重载起动时，小容量的可考虑选择高起动转矩的笼型异步电动机，大容量的则可选择绕线转子异步电动机为宜。

2）只需要几种转速且不需要连续调节转速的机械，可选择多速电动机。若机械需要连续调速，要结合调速方法选择不同类型的调速电动机。要求调速范围很宽的机械，最好采用机械调速和电气调速相结合的方法选择电动机，这样容易达到较高的技术经济指标。

3）对特殊要求的机械，如起动或制动要求较高的机械，如起重机械、卷扬机等，可选专用电动机来拖动。

5. 异步电动机结构型式的选择

对异步电动机，各种结构型式主要适应不同的工作场合和环境。所以其选择方法是

1）根据安装方式的不同选择立式安装或卧式安装结构。

2）在正常环境条件下，一般采用防护式电动机，在人员和设备安全得到保证的清洁场合，宜采用开启式电动机。

3）在空气中存有较多灰尘的场合，宜采用封闭式电动机。

4）在湿热地区或比较潮湿的地方，应选择湿热带电动机；若采用普通型电动机，必须有防潮措施。

5）在有腐蚀性气体或游离物的场所，或者有爆炸危险的场所，或者必须在水中（油中）工作的电动机，要选择专用防护型式的电动机。此类电动机的特点将在后面专门介绍。

6）除了上述为适应环境而选择不同结构型式的电动机之外，还有特殊工作的机械也要求特殊结构的电动机与其配套，比如，平移动作的机械选择直线型异步电动机，既简化了机械结构，操作控制也更加方便。

三、电动机的安装检查

选择好的三相异步电动机在使用前要进行必要的检查和正确的安装，这是保证电动机正常运行的前提。

1. 电动机的安装

根据使用情况和容量的不同，电动机要选择好安装基础。如：为机床配套的电动机固定在机床上的特定位置上，或者和机床同时固定在水泥地基上。无论选择在哪里安装，都要使电动机和机械负载之间的相对位置留有必要的调节余地，以便和传动装置进行校正。安装好的电动机要保证转动灵活平稳。

此外，要注意电动机的外壳接地或接零保护装置，电压在1kV以下的电动机保护接地电阻不应小于4Ω。

保证安装完的电动机和电源之间的接线应正确、牢固。同时检查线路中的各部件是否完好、是否符合技术要求，这段工作不能马虎，否则会给电动机运行造成隐患。

2. 电动机使用前的检查

1）绝缘电阻的测量。对新安装或长期停用的三相异步电动机在使用前，首先要测量检

查定、转子绕组各相之间和绕组对地的绝缘电阻。对输入时的电源线电压为 380V 的电动机，绝缘电阻一般要求都在 5MΩ 以上，最低不应小于 0. 5MΩ。

2）对绕线式三相异步电动机，还要检查集电环上的电刷及电刷提升机构是否处于正常状态。电刷压力要求在 0. 15 ~0. 25kg/cm²

3）检查电动机的机械联接及固定是否可靠，传动部分是否灵活，轴承要有足够的润滑油。

4）安装完的三相异步电动机，要再次检查它及其控制设备的接线。接地是否正确和完整，接触处是否牢固。另外，还要查看电源电压及频率是否正常，它们应和电动机铭牌规定的数值相符合。

上述的检查项目有的可在安装前进行，也可在安装过程中进行。总之，经检查确保无误后，再通电试机。

3. 电动机供电线路导线的选择

电动机的供电线路是指电源（供电变压器）到电动机之间的线路。它所使用的导线主要从其截面积的大小选择。导线截面积大小的选择主要从机械强度，容许电流以及电压降三方面考虑。

（1）根据机械强度选择导线截面积

导线的机械强度不够，将容易发生断路事故，而导线的机械强度与选择的导线种类和截面积大小有关。选择时，在室外的架空线最小截面积或直径不应小于表 2-1 中的规定。室内布线的最小截面规定见表 2-2（穿管导线或电缆可不考虑）。

表 2-1　室外架空线的最小截面积或直径

导线的结构和材料		最小截面积或直径
单股	铜	截面面积 $6mm^2$
	钢铁	直径 2. 75mm
	铝	不允许用
多股	铁、钢、铜	截面面积 $10mm^2$
	铝	截面面积 $16mm^2$
	镀锌铁线	直径 3mm

注：相邻两个电杆的距离应在 50m 以内，太远也会断线。

表 2-2　室内布线的最小容许截面积规定

用　　途	铜/mm^2	铝/mm^2
用瓷柱、瓷夹固定，支持物距离不超过 1m	1. 0	4. 0
用瓷瓶固定，支持物距离不超过 1m	1. 5	4. 0
固定装设在屋内绝缘支持物上，支持物距离 1 ~2m	1. 5	4. 0
固定装设在屋内绝缘支持物上，支持物距离 6m 以下	2. 5	4. 0
固定装设在屋内绝缘支持物上，支持物距离 12m 以下	4. 0	10. 0
固定装设在屋内绝缘支持物上，支持物距离超过 12m	6. 0	16. 0

（2）根据导线容许的电流选择导线截面积

每一种规格的导线都有一定的容许电流，如果电流超过了容许值，就会使导线过热，甚至烧坏。每种导线的容许值可查阅相关电工手册。选择的导线的容许电流不仅要大于电动机的额定电流，而且不能小于熔丝的额定电流或自动开关的整定电流。

（3）根据导线允许的电压降选择导线截面积

电流通过导线时会产生电压降，一般线路的电压降不应超过5%，否则就会造成电动机的电源电压过低，影响其起动和运行。

电压降的大小和导线的截面积及长度有关，截面积越小，线路越长，电压降就越大。所以在送电距离一定时，导线截面积又不能太小。线路的电压降可依下列公式算出：

$$\Delta U\% = \Delta u\% PL$$

式中　$\Delta U\%$——线路电压降；

$\Delta u\%$——单位电压降（%/kW·m），见表2-3；

P——负载功率；

L——送电线路长度（km）。

选择导线时，先按容许电流预选导线截面积，看其截面积是否等于或大于表2-1或表2-2规定的最小容许截面积，保证机械强度符合要求，然后进一步验证线路电压降是否合格。如果验算的不满足要求，则重选截面积大一些的导线再行验算，直至满足要求为止。

表2-3　380V三相架空线单位电压降

导线型号 / 单位电压降/(%/kW·m) / 功率因数	LJ-16	LJ-25	LGJ-35 和 LJ-35	LGJ-50 和 LJ-50	LGJ-70 和 LJ-70	LGJ-95 和 LJ-95
1	1.35	0.88	0.63	0.435	0.31	0.23
0.8	1.53	1.06	0.81	0.617	0.492	0.41
导线型号 / 单位电压降/(%/kW·m) / 功率因数	TY-6	TY-10	TJ-16	TJ-25	TJ-35	TJ-50
1	2.12	1.27	0.83	0.512	0.373	0.27
0.8	2.3	1.45	1.01	0.693	0.555	0.45

例：在离变压器150m处安装一台17 kW的电动机（$\cos\varphi = 0.8$，$u_N = 380V$，$I_N = 33A$），试选择送电线路的导线。

解：此电动机的额定电流为33A，起动电流$I_{st} = 7I_N$，求得熔丝的额定电流为

$$I_{熔} = \frac{7 \times 33}{2.5} = 92.4A$$

按容许电流计算，查手册知LJ-16导线（铝绞架空空线），容许电流为105A，同时截面积16mm^{2}也满足机械强度要求。并查LJ-16的$u\% = 1.53$，计算：

$$\Delta U\% = 1.53\% \times 17 \times 0.15 = 3.9\% < 5\%$$

故选LJ-16导线是适合的。

第二节　三相异步电动机的直接全压起动和反转

电动机接通电源后，从静止状态到稳定运行状态，此过程称为电动机的起动过程。

尽管电动机的起动过程经历时间很短，但是对三相异步电动机来说，有两个问题值得注意。

异步电动机起动时，因为经历一个转速很低的阶段，所以转子电流很大，定子电流也很大。通常，将刚刚起动瞬时（$n=0$）的定子电流称为电动机的起动电流，用 I_{st} 表示，一般情况下，$I_{st}=(4\sim7)I_N$。过大的起动电流会使起动频繁的电动机过热。另一方面会使电网产生较大的线路电压降，致使电源端部电压降低。这样，异步电动机的起动必然影响同一电网上其他电气设备的正常工作。特别在容量较小的电网中，大功率的异步电动机起动，其影响更为严重。

其次，电动机产生的起动转矩比所带的负载转矩越大，越有利于缩短起动时间。但是三相异步电动机的起动转矩 T_{st} 并不太大。如果电动机轻载起动，它的起动转矩还能满足要求，倘若所带负载很重，它的起动转矩就显得不足，这不仅仅延长了起动时间，还会使电动机因长时间通过大电流而出现过热，甚至烧坏。尤其对起动频繁的三相异步电动机，这个问题更突出。

因此，三相异步电动机的起动，既要使其起动电流不要过大，又要使其起动转矩尽可能大，满足生产机械的要求。

在生产实际中，根据不同的情况采用了多种起动方法。本节首先介绍三相异步电动机直接全压起动的方法。

一、直接全压起动方法适用的场合

将三相异步电动机直接接在额定电压的电网上起动，称为直接全压起动。为了避免电动机起动时出现前面所说的两个问题，直接全压起动方法适用于小型普通笼型异步电动机带着轻载（或空载）起动。这是因为，尽管小功率电动机起动电流较大，但是对电网的影响并不严重。既然电动机又带着轻载（空载）起动，异步电动机产生的起动转矩一般能满足要求。

为了保证对电网不引起太大的线路电压降，允许直接起动的电动机要满足下面的经验公式：

$$\frac{I_{st}}{I_N}\leqslant\frac{3}{4}\times\frac{\text{供电变压器的容量(kVA)}}{4\times\text{电动机的额定功率(kW)}}$$

如果$\frac{I_{st}}{I_N}=4\sim7$，则允许直接全压起动的电动机额定功率（单位：kW）为电源容量（单位为 kVA）的 1/（13～25）。

通常规定用电单位如果有专用变压器供电，而电动机又不是频繁起动，则它的额定功率不大于供电变压器容量的 30% 时，即可允许采用直接全压起动。如果电动机起动频繁，则它的额定功率不大于供电中变压器的 20% 时，可允许采用直接全压起动。若用电单位无专用变压器供电（例如与照明共用），允许直接全压起动的电动机功率应以保证电动机起动时，电网电压下降不超过 5% 为原则。

因为直接全压起动的操作以及起动设备简单，并且容易实现自动控制，因此随着电网容量的不断增大，只要电网允许，应该尽可能采用此方法。

二、直接全压起动的典型控制电路

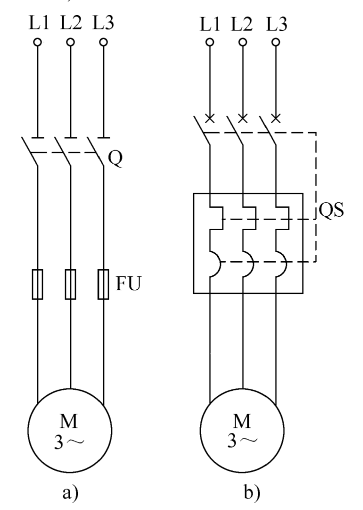
目前，采用直接全压起动三相笼型异步电动机的应用非常广泛，而且有多种自动的控制方法。这里仅举常见的几种典型控制电路。

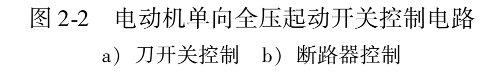
1. 开关控制电路

图 2-2 所示为电动机单向全压起动开关控制电路。其中图 2-2a 为刀开关控制电路，它还具有熔断器 FU 起短路保护作用。图 2-2b 为断路器控制电路，它具有长期过载和过电流保护。当合上刀开关或断路器，电动机即可直接起动旋转，断开刀开关或断路器，电动机停转。这种电路只适合于不频繁起动的小容量电动机，且都不能实现远距离控制。

2. 接触器控制的连续运转电路

图 2-3 所示为电动机单向全压起动并连续运转的接触器控制电路。电动机的起动和停止主要由接触器 KM 和按钮 SB1、SB2 共同完成。当按下起动按钮 SB2 后，KM 线圈通电吸合，其主触头闭合，使电动机直接通电起动并旋转，辅助触头闭合起自锁作用。若使电动机停止，按 SB1 即可使 KM 断电，触头复位，电动机断电停止。电路设有短路保护 FU1、FU2 及过载保护 FR，接触器 KM 还兼有欠电压和失电压保护，这种电路操作方便、安全。




图 2-2　电动机单向全压起动开关控制电路
a）刀开关控制　b）断路器控制

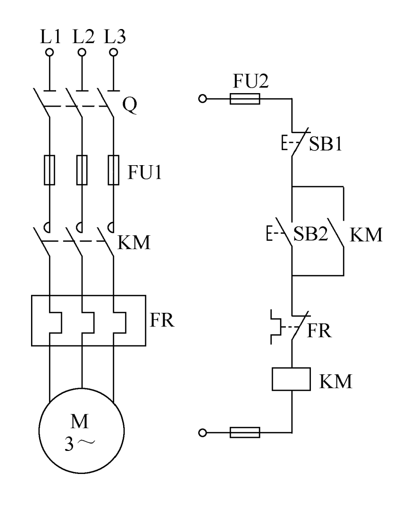


图 2-3　电动机单向全压起动并连续运转的接触器控制电路

3. 电动机的点动控制电路

当生产机械需要调整或点动运行时，拖动机械的电动机就要采用点动控制。这里介绍几种控制电路。图 2-4 所示为三种不同的控制方式的电路。点动控制与连续运转控制的根本区别就是在控制电路中有无自锁电路。

其中，图 2-4a 是最基本点动控制电路。按下 SB 后，KM 通电吸合，主触头闭合，电动机通电起动旋转。当松开 SB 后，KM 断电复位，电动机即断电停转。图 2-4b 是既可实现点动控制，又可实现连续运转的控制电路，主要由手动开关 SA 进行选择。当 SA 闭合时，为

自锁电路接入而成为连续运转控制，当 SA 断开时自锁电路断开，则成为点动控制。图 2-4c 是在控制电路中增加了一个复合按钮 SB3，与连续运转控制的起动按钮 SB2 并联，SB3 成为点动控制按钮。按、松 SB3 即可使电动机点动，按 SB1 使电动机停止。

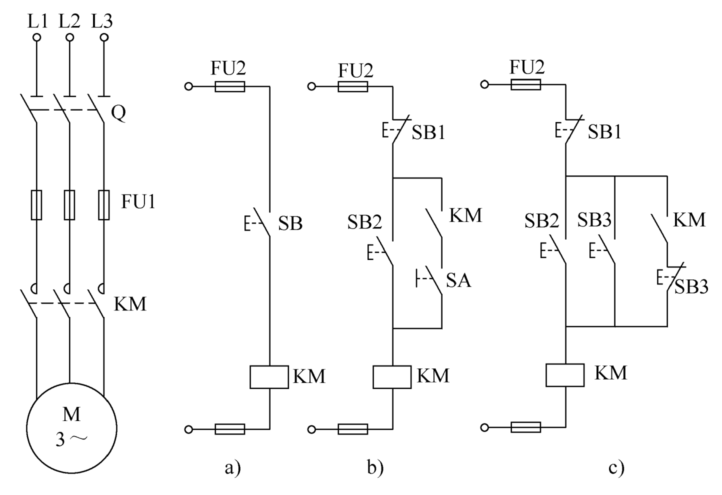


图 2-4　电动机点动控制电路

4. 联锁控制电路

一台生产机械或一条自动线往往有多台电动机，它们相互配合完成一定的工作。这些电动机之间常有一些制约关系。例如：有的电动机要按顺序先后起动；有的不允许同时工作；有的不允许单独工作等等。这些要求反映在控制电路中称为联锁。这里仅举常见的几例。

按先后顺序起动控制，图 2-5 所示为两台电动机按顺序先后起动的控制电路。其中 M_1 为先起动的电动机，由 KM1 控制；M2 为后起动的电动机，由 KM2 控制。分别由起动按钮 SB2 和 SB4 实现。停止时按 SB1，两台电动机均停止，若按 SB3，只 M2 停转。

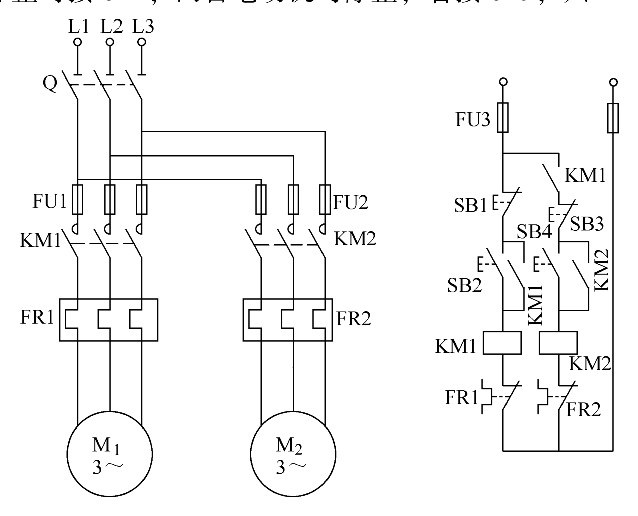


图 2-5　两种电动机按顺序先后起动的控制电路

不允许单独工作的控制，指两台电动机必须同时运转，不允许单独运转，否则工作不正

常或造成事故。图 2-6 所示为两台电动机同时工作的控制电路。

不允许同时工作的控制，某些多工位机床上不同方向的动力头，不允许同时工作，否则互相碰撞。图 2-7 是两台电动机只能单独工作，不允许同时工作的控制电路。

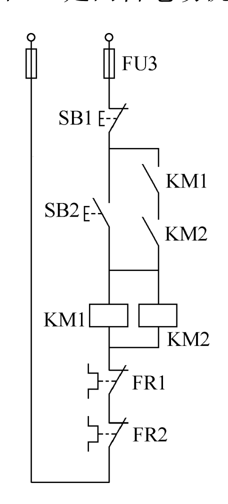


图 2-6　两台电动机不允许单独工作的控制电路

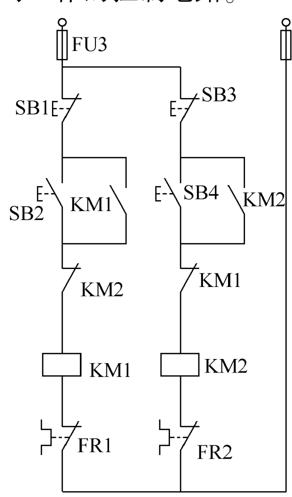


图 2-7　两台电动机不允许同时工作的控制电路

5. 两地控制电路

在一些机械上，为使工人操作方便，在不同位置均可控制操作电动机的工作和停止，这种称为多地控制电路。图 2-8 所示为两地控制同一台电动机的运转和停止控制电路。其中，甲、乙两地的起动按钮采用并联，而停止按钮采用串联即可。

三、三相异步电动机的反转方法及控制

三相异步电动机的基本工作原理已经告诉我们，电动机转子旋转的方向和其旋转磁场旋转的方向是一致的，若使电动机转子反转，只要调换电动机的任意两相电源线，改变旋转磁场的转向即可达到目的。

这种方法对直接全压起动的三相异步电动机很容易实现。按三相异步电动机电源线倒线时所用设备不同，常见的有转换开关控制和正反转接触器控制两种电路。

1. 转换开关控制电动机正反转电路

图 2-9 所示为转换开关控制电动机正反转电路。其中转换开关 SA 是专门制作的一种开关。它有 4 对触头，3 个位置。图 2-9a 用转换开关直接控制电动机的正反转，SA 扳到上方位置，电动机端线 U、V、W 分别直接与电源 L1、L2、L3 相接，电源开关 Q 合上时，电动机正转；当 SA 扳回中间位置时，电动机断开三相电源，电动机停转；当 SA 扳至下方位置，电动机的 U、V、W 分别直接与电源 L3、L2、L1 相接，电动机实现了反转。这种控制方法简单，但因转换开关无灭弧装置，仅限于 5. 5kW 以下的电动机正反转采用。图 2-9b 的 SA 只用作预选电动机的旋转方向，电动机的起停全由接触器、按钮组成的接触器控制电路来实现。

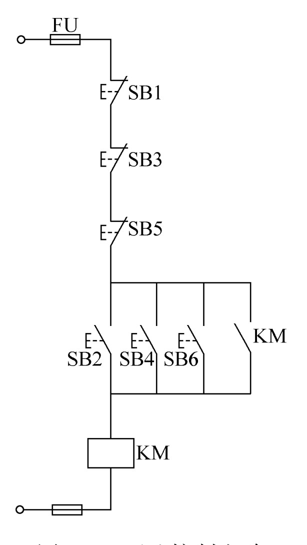


图 2-8　两地控制电路

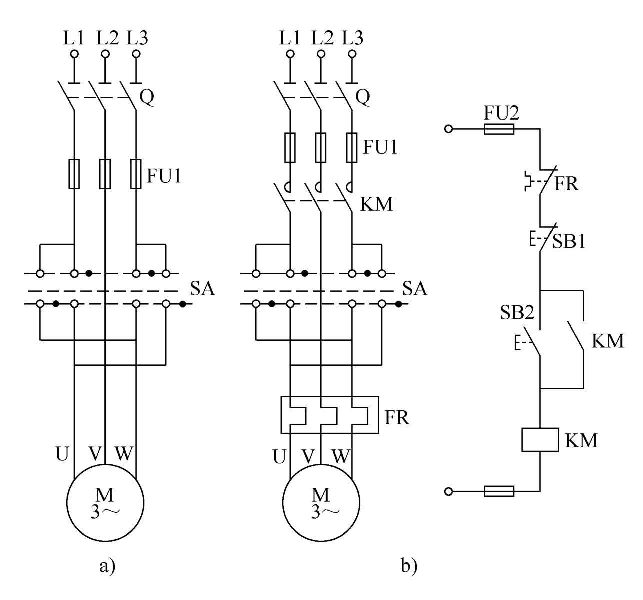


图 2-9　转换开关控制电动机正反转电路

2. 接触器控制电动机正反转电路

此种电路实质上是一个电动机正转接触器控制电路与一个电动机反转接触器控制电路的组合，但是为了避免该操作引起电源的相间短路，在两个单向运行控制电路中设置了必要的互锁。图 2-10 所示为接触器控制电动机正反转的几种控制电路。

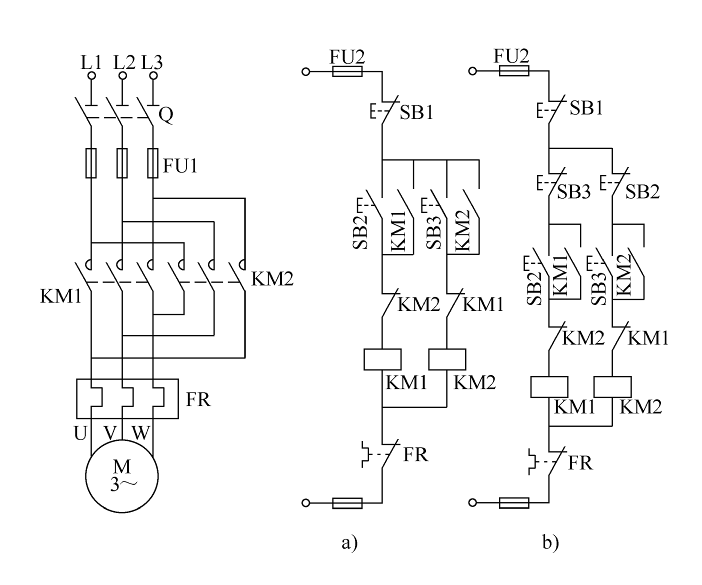


图 2-10　接触器控制电动机正反转电路

在控制电路中，主电路中的两接触器 KM1 和 KM2 的主触头闭合，使电动机与电源接线不同（倒相），会使电动机出现正、反两种转向。图 2-10a 的控制电路中，KM1 和 KM2 两接

触器常闭辅助触头分别串接到对方线圈电路中，形成相互制约的互锁控制，以防误操作使电源两相短路。此种为“正—停—反”与“反—停—正”控制顺序。

图2-10b是在图2-10a的基础上又加了用复合按钮SB2和SB3组成的按钮互锁控制，这样形成了“正—反—停”操作顺序，使得电动机的控制操作更方便简捷，因此在生产实际中应用的更广泛。

3. 自动往返行程控制电路

在某些机械上，如龙门刨床、导轨磨床的工作台需要自动往返运行。带动工作的电动机需要自动往复正反转运行。这种控制是在前面正反转控制电路中再添置行程开关SQ1、SQ2即可实现。控制电路如图2-11所示，图中SQ3、SQ4是增设的两个运动方向的限位保护开关。从而避免运动部件越出允许位置而导致事故发生。

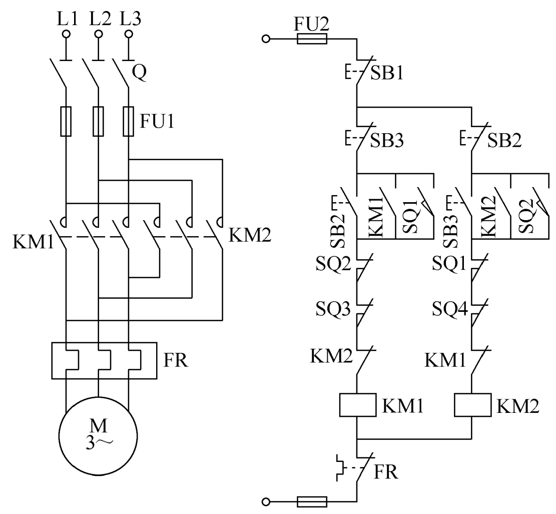


图2-11　自动往返行程控制电路

第三节　三相异步电动机的减压起动

对较大功率（一般在10kW以上）的三相笼型异步电动机，若采用直接全压起动，由于起动电流很大，很容易超过电网的允许电流范围。因此，减小电动机的起动电流是此类起动时要解决的主要问题。

解决的方法是：电动机在起动时，降低电动机定子绕组所加的电压。这样，电动机的主磁通减小，使转子起动时的电流减小，定子上的起动电流也随之减小。起动完毕，将定子绕组所加的电压再恢复到原来的额定值，使电动机在正常电压下运行。此方法简称减压起动。但是，由于三相异步电动机的转矩与其所加的电压平方成正比，所以减压起动在电动机起动电流减小的同时，它的起动转矩降低更多。因此，只有带轻载起动和空载起动的电动机才适合采用此方法。在生产实践中，有多种减压起动措施，这里仅介绍常用的几种，以便于选择。

一、星-三角起动（Y-△起动）

星-三角起动是将定子绕组为三角形接法的异步电动机，起动时改为星形联结。在电源的额定线电压的作用下，电动机每相定子绕组的相电压降低，达

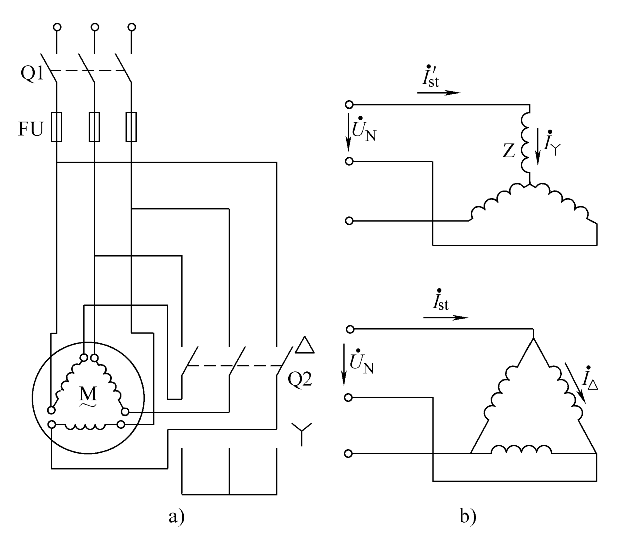


图2-12　Y-△起动

a）Y-△起动接线图　b）两种接法的电量示意图

到减压起动的目的。其接线原理图如图 2-12 所示。

起动时，将开关 Q2 投向“Y”位置，定子绕组为星形联结，电动机减压起动。当它的转速接近稳定值时，再将开关 Q2 迅速投向“△”位置，定子绕组改为三角形联结，电动机开始运行。

由分析可知，Y-△减压起动时，三相异步电动机的起动电流和起动转矩均下降到△联结起动时的$\frac{1}{3}$。

Y-△减压起动法设备简单，可以频繁起动。但是此方法只适合于△联结的三相异步电动机，而且电压降低的倍数不能调整。

Y-△起动，常用的专用起动设备有 QX1、QX2 系列手动Y-△起动器；QX4 系列自动油浸Y-△起动器，LC3-D 系列Y-△减压起动器等。也可接成自动控制来实现，这里，仅举 QX4 系列自动Y-△起动器控制原理图，如图 2-13 所示。

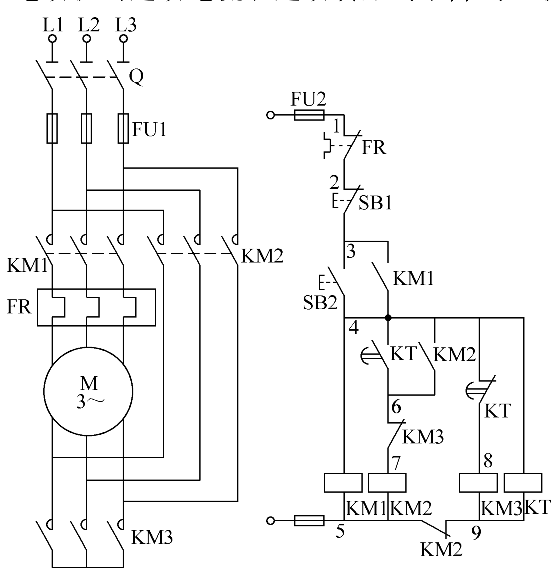


图 2-13　QX4 系列自动Y-△起动器电路

合上三相电源开关 Q，按下起动按钮 SB2，KM1、KT、KM3 线圈，同时通电吸合并自锁。电动机三相定子绕组接成星形接入三相交流电源进行减压起动，当电动机接近额定转速时，通电延时型时间继电器 KT 动作，其触头 KT（4-8）断开，KT（4-6）闭合，使 KM3（6-7）触头通电吸合，电动机由星形联结改接成三角形联结进入正常运转。而 KM（5-9）触头断开，使 KT 在电动机Y-△减压起动完成后断电释放，并实现 KM2 和 KM3 的电气互锁。

二、延边三角形起动

延边三角形起动方法是在Y-△起动的基础上发展而成的。电动机的三相定子绕组，每一相除首尾两端点外，按一定的比例在绕组中还抽出一个端点。起动时，如图 2-14a 所示的接法，三相绕组的一部分接成三角形，另一部分按星形联结。合起来象一个三角形的每边都延伸出一段，故称延边三角形。运行时，再接成图 2-14b 所示的三角形联结。

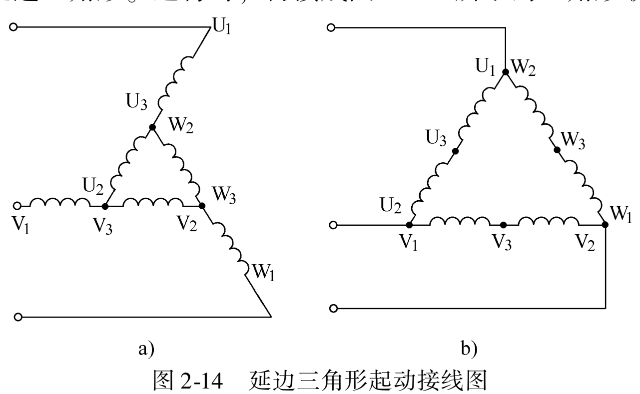


图 2-14　延边三角形起动接线图

a）起动时接法　b）运行时接法

延边三角形起动，只有一部分绕组改为星形联结，因而起动电流和起动转矩可以少降低一些。而且中间抽头的位置不同，降低的比值也不一样。这样，可适用不同情况的要求。

设每相绕组中，星形联结部分的串联匝数为 N_1，三角形联结部分的串联匝数为 N_2，它们的比值为 a，即

$$a=\frac{N_1}{N_2}$$

据理论推导，延边三角形起动时的起动电流和起动转矩降低的比值相同，其表达式为

$$\frac{I'_{st}}{I_{st}}=\frac{T'_{st}}{T_{st}}=\frac{1+a}{1+3a}$$

从上式看出，当绕组抽头不同，a 不同，电动机的起动电流和起动转矩可以得到不同比值的降低。如：当 $a=1$ 时（绕组为中心抽头），$N_1=N_2$，那么

$$\frac{I'_{st}}{I_{st}}=\frac{T'_{st}}{T_{st}}=\frac{1}{2}$$

这种起动方法的主要优点是,可根据负载要求,灵活地改变绕组抽头,使起动电流和转矩降低不同的数值。但是,绕组的抽头必须在电动机制造时专门设计。而且,一台电动机往往每相只有一个抽头,不能随意更改。另外,比Y-△起动的接线复杂。这个缺点,也限制了延边三角形起动的发展。一般在专用设备中配套电动机采用。

延边三角形起动采用起动控制器，如 XJ1 系列减压起动控制箱。延边三角形起动控制原理图如图 2-15 所示。其中，图 2-15a 为延边三角形的定子绕组接线图。每相绕组端头分别为 U_1、U_2、U_3 与 V_1、V_2、V_3 以及 W_1、W_2、W_3，其中 U_2、V_2、W_2 分别为各相绕组的抽头，U_1、V_1、W_1 为首端，U_3、V_3、W_3 为尾端。当接触器 KM1、KM2 触头闭合，KM3 触头断开时，为延边三角形联结；当 KM2、KM3 触头闭合，KM1 触头断开时，则为三角形联结。图 b 为起动控制电路原理图。

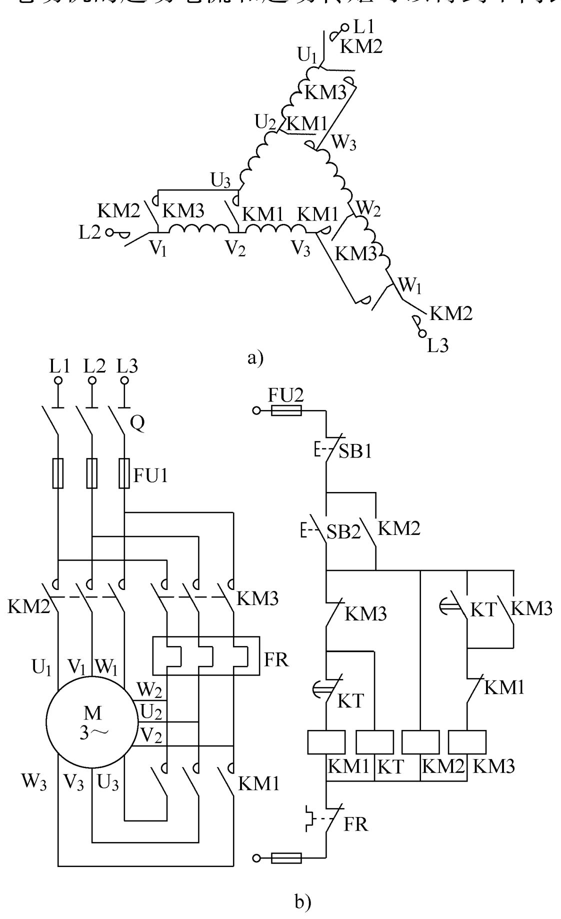


图 2-15　延边三角形减压起动电路

a）延边三角形的定子绕组接线图　b）起动控制电路原理图

电路的工作情况是，合上电源开关 Q，按下起动按钮 SB2，KM1、KM2，KT 线圈同时通电并自锁，电动机定子接成延边三角形减压起动。当电动机的转速接近额定转速时，时间继电器 KT 动作，其相应的触头闭合或断开，使 KM1 线圈断电释放，KM3 线圈通电吸合并自锁，电动机定子由延边三角形换接为三角形联结，电动机正常运行。图中延边三角形联结接触器 KM1 和三角形联接触器 KM3 之间设有互锁环节。

三、自耦变压器减压起动

三相异步电动机起动时，用自耦变压器降低电源电压，即一次侧接在电网上，二次侧接在电动机的定子绕组上。这样电动机定子绕组获得的是变压器的二次电压 U_2，设自耦变压器的变压比 $K=U_1/U_2>1$，则电动机所加的电压为电网额定电压的 $1/K$，这样起动时，电网供给的起动电流减小为直接全压起动的 $1/K^2$，电动机的起动转矩为直接起动时的 $1/K^2$。待起动后，再将电动机改接到电网上正常运行，其原理如图 2-16 所示。

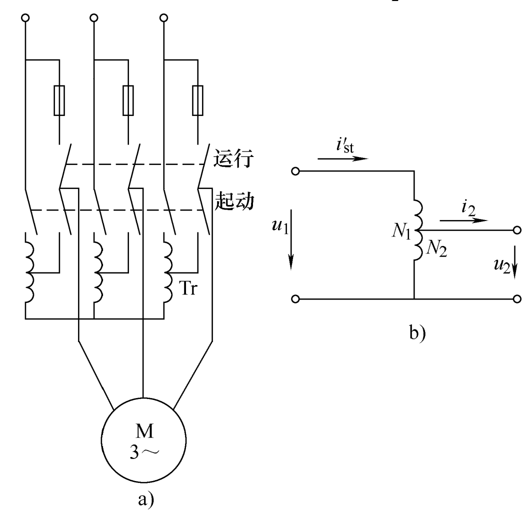


图 2-16　自耦变压器起动原理图

a）自耦变压器接线原理图　b）自耦变压器一相原理图

自耦变压器的二次绕组上有多个抽头，以获得不同电压比 K，从而满足不同起动场合的需求。例如：减压比值 $\left(\frac{1}{K}\right)$ 的百分数有 40%、60%、80% 或 55%、64%、73% 或 65%、80% 等。

自耦变压器减压起动时，通常有手动和自动控制两种方式。

1. 手动控制的自耦变压器减压起动

常用的 QJ10 系列空气式手动自耦减压起动器（俗称起动补偿器），适用于电压 380V 以下，容量 75kW 及以下的三相笼型异步电动机，用于不频繁降压起动和停止，其原理图形如图 2-17 所示。

QJ10 系列手动自耦减压起动器由起动触头、运行触头、Y联结触头、手动操作机构、自耦变压器保护元件与箱体部分组成，具有过载，断相和欠电压等保护装置。二次绕组有两种分接头，可获得 80% 或 65% U_N 两种电压。

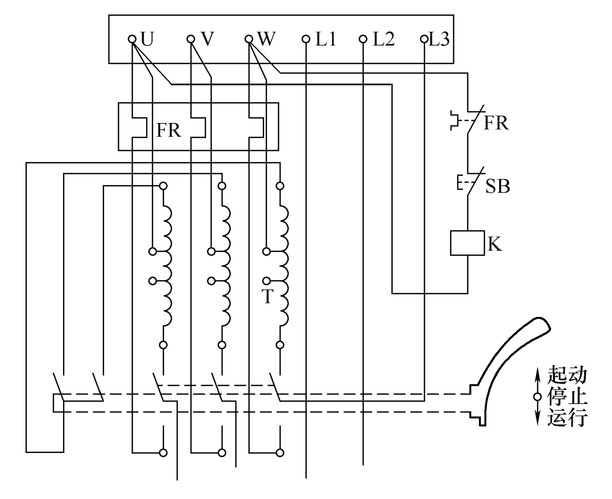


图 2-17　QJ10 系列手动自耦减压起动原理接线图

当操作手柄置于“停止”位置时，起动触头、运行触头、Y联结触头均断开，电动机不通电，处于停止状态；当手柄置于“起动”位置时，起动触头与Y联结触头闭合，自耦变压器接成Y联结，接在三相电源上，经自耦变压器二次侧的 80% 或 65% 抽头接到三相笼型异步电动机的定子接线端（U、V、W），获得减压起动。当电动机转速接近额定转速时，将手柄迅速扳到“运行”位置，起动触头、Y联结触头断开，运行触头闭合后，三相电源直接送入电动机定子，电动机在额定电压下正常运行。当需要停止时，按下停止按钮 SB，欠电压脱扣线圈 K 断电，经机械操作机构自动使操作手柄返回“停止”位置，运行触头断开，电

动机切断三相电源，电动机停转。

2. 自动控制的自耦变压器减压起动

自动控制的自耦变压器减压起动是由自耦变压器、接触器、时间继电器、按钮和一些保护电器元件组成的减压起动控制电路。图2-18所示为XJ01系列自动控制的自耦变压器减压起动原理接线图。

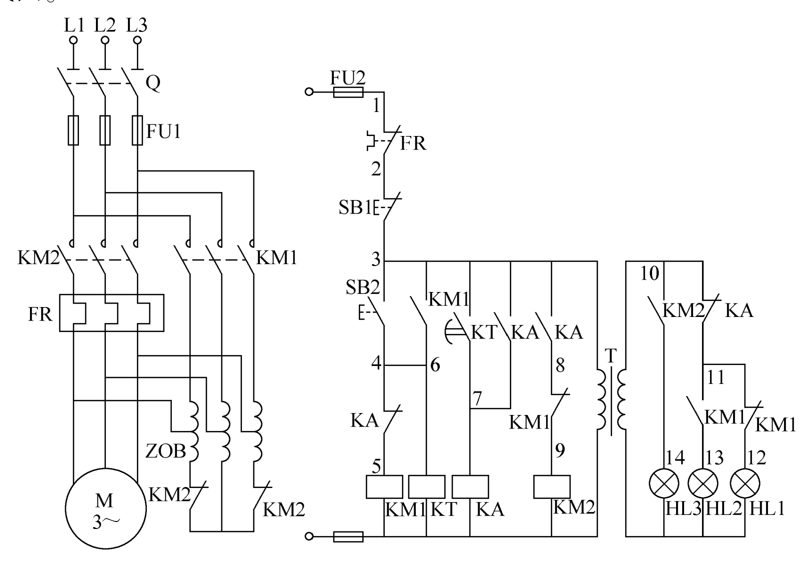


图2-18　XJ01系列自耦减压起动器电路图

图中，ZOB为自耦降压变压器，KM1为减压起动接触器，KM2为运行接触器，KA为中间继电器，KT为减压起动时间继电器，HL1、HL2、HL3分别为电源、减压起动、正常运行的指示信号灯。

电路工作情况：合上电源开关Q，HL1灯亮，表明电源电压正常。按下起动按钮SB2，KM1、KT线圈同时通电并自锁，将自耦变压器ZOB接入，电动机定子经自耦变压器供电做减压起动，同时，HL1灭，HL2亮，显示电动机正进行减压起动。当电动机转速接近额定转速时，时间继电器KT通电延时闭合触头（3-7）闭合，使KA线圈通电并自锁，其触头KA（4-5）断开，使KM1线圈断电释放，将自耦变压器切除；触头KA（10-11）断开，HL_2灭；而触头KA（3-8）闭合，使KM_2线圈通电吸合，电源电压全部加在电动机定子上，电动机进入正常运转，同时HL3指示灯亮，表明电动机减压起动结束，进行正常运行。

除上述系列起动器外，生产实际中还有如JJ1系列等自耦减压起动控制柜。读者可查阅有关资料或手册选用。

四、各种起动方法的选择

以上介绍的三相笼型异步电动机几种起动方法的比较见表2-4，比较中，各有优缺点。在实际生产中究竟选择哪种方法，还需要通过分析计算才能确定。一方面要校核电动机起动时，电网供给的起动电流是否在允许范围内，（$I'_{st}\leqslant I_{允}$）；另一方面还要校核电动机产生的起动转矩是否满足机械负载的起动要求（$T'_{st}>T_L$）。只有二者同时满足，才能确定该起动方法可采用。如果有同时都满足的几种起动方法，要优先采用设备简单，操作方便的起动方法。

表 2-4　三相笼型异步电动机直接起动和减压起动方法比较

起动方法	起动时电动机相电压(相对值)	起动时电网供给的线电流(相对值)	起动转矩(相对值)	起动设备比较
直接全压起动	1	1	1	最简单
Y-△起动	$1/\sqrt{3}$	1/3	1/3	简单,只能用于△联结的电动机
延边三角形起动	中心轴头	1/2	1/2	简单,电动机需专门设计
自耦变压器起动	$1/K$	$1/K^2$	$1/K^2$	较复杂,有几种抽头供选用

现举例说明起动方法的选择

【例 2-1】　现有一台三相笼型异步电动机，△联结，$P_N=28\text{kW}$，$U_N=380\text{V}$，$I_N=58\text{A}$，$\cos\varphi_N=0.88$，$n_N=1455\text{r/min}$，起动电流倍数 $I_{st}/I_N=6$，起动转矩倍数 $K_{st}=1.1$，过载倍数 $K_m=2.3$。供电变压器要求电动机的起动电流≤150A。负载电阻转矩 $T_L=73.5\text{Nm}$，试选择一种合适的起动方法。

解：(1) 计算电动机的额定转矩 T_N

$$T_N=9550\frac{P_N}{n_N}=9550\times\frac{28\text{kW}}{1455\text{r/min}}=183.78\text{N}\cdot\text{m}$$

(2) 校核直接起动方法

直接起动时，电动机的起动电流：

$$I_{st}=6I_N=6\times58\text{A}=348\text{A}$$

因为 $I_{st}>150\text{A}$，所以不能采用直接起动的方法。

(3) 校核Y-△起动方法

Y-△起动时，起动电流：

$$I'_{st}=\frac{1}{3}I_{st}=\frac{1}{3}\times348\text{A}=116\text{A}$$

$$I'_{st}<150\text{A}$$

起动转矩：

$$T'_{st}=\frac{1}{3}T_{st}=\frac{1}{3}\times1.1\times183.78\text{N}\cdot\text{m}=67.39\text{N}\cdot\text{m}$$

$T'_{st}<T_L$ (73.5N · m)，所以不能采用Y-△起动方法。

(4) 校核自耦变压器减压起动的方法

选抽头为 55%、64%、73% 的自耦变压器。

取 55% 抽头时，其起动电流和起动转矩为

$$I'_{st1}=0.55^2I_{st}=0.55^2\times348\text{A}=105.27\text{A}\qquad I'_{st1}<150\text{A}$$

$$T'_{st1}=0.55^2T_{st}=0.55^2\times1.1\times183.78\text{N}\cdot\text{m}=61.15\text{N}\cdot\text{m}$$

因为 $T'_{st1}<T_L$，所以不能采用此抽头；

取 64% 抽头时，

$$I'_{st2}=0.64^2I_{st}=0.64^2\times348\text{A}=142.5\text{A}\qquad I'_{st2}<150\text{A}$$

$$T'_{st2}=0.64^2T_{st}=0.64^2\times1.1\times183.78\text{N}\cdot\text{m}=82.8\text{N}\cdot\text{m}$$

$$T'_{st1}>T_L$$

取 73% 抽头时，

$$I'_{st3} = 0.73^2 I_{st} = 0.73^2 \times 348\text{A} = 185.45\text{A}$$

因为 $I'_{st3} > 150\text{A}$，所以也不能采用此抽头。

结论：此台电动机宜选用抽头为 64% 的自耦变压器减压起动。

第四节　三相绕线转子异步电动机的起动

三相异步电动机的转子回路可以外接适当的电阻，增加转子电阻值。这样，不仅使电动机的起动电流减小，而且它的起动转矩还可增大，改善了电动机的起动性能。这不仅使得经常重载起动的起重设备采用此类电动机进行起动，对较大功率的三相绕线转子异步电动机，也采用此方法起动。

在生产实际中，对三相绕线转子异步电动机常用两种方式起动。

一、转子回路串联电阻起动

图 2-19a 所示为这种起动方式的接线原理图。起动时，定子绕组接通三相额定电压，转子绕组同时经电动机的集电环和电刷外接起动电阻 R。随着电动机的转速上升，由于转子电动势及频率逐渐减小，为了使电动机的转速不下降，要逐级切除起动电阻。待电动机的转速达到稳定后，串接的起动电阻全部切除，再用提刷装置将集电环与电刷分离，并把集电环短接。对起动频繁的电动机，例如起重用电动机，因为处于起动状态的时间长，所以串接的电阻可以不必切除。

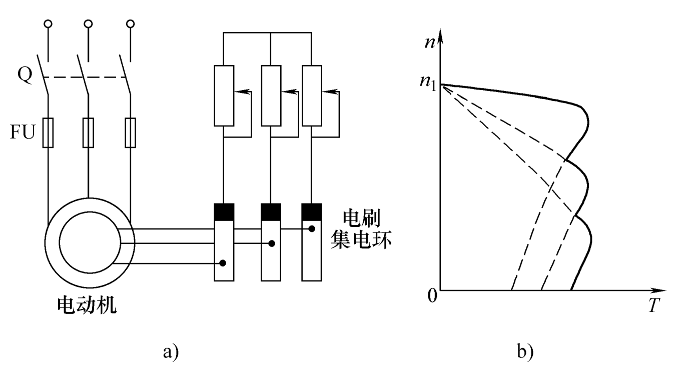


图 2-19　三相绕线式电动机串电阻起动原理

a）接线原理图　b）机械特性

为了便于操作和控制，生产实际中起动电阻随电动机的转速上升是分段切除的，在切除过程中，有时电动机的电流和转矩突然上升，所以一定要适时掌握。图 2-19b 所示为采用这种起动方法时电动机的机械特性。

这里介绍两种用接触器控制的起动电路，供应用中参考。

1. 按时间原则控制的自动起动电路

图 2-20 所示为按时间原则短接电阻的自动起动电路。图中，转子串入三级电阻。KM1 为定子线路接触器，KM2、KM3、KM4 为短接电阻接触器，KT1、KT2、KT3 为起动时间继电器。

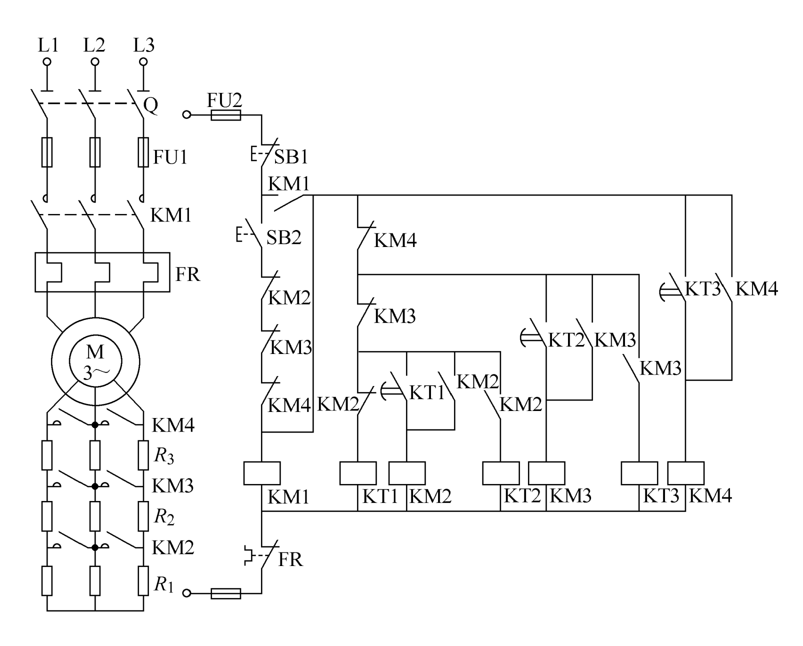


图 2-20　时间原则短接电阻的自动起动电路

需要注意的是，电动机起动后进入正常运行时，只有 KM1、KM4 线圈长期通电工作，而 KT1、KT2、KT3 与 KM2、KM3 线圈的通电时间，均压缩到最低程度。一是电路工作时，这些电器没必要长期处于通电状态；二是为了省电，减少电路故障，保证电路安全可靠工作。

此电路存在两个问题：一旦时间继电器损坏，电路将无法实现电动机的正常起动和运行；另一方面，在起动过程中，短接电阻时将使电动机的电流及转矩突然增大，会产生较大的机械冲击。

2. 按电流原则控制的起动电路

图 2-21 所示为按电流原则短接电阻的起动电路原理接线图。它是按照电动机在起动过程中转子电流变化来控制电动机电阻的切除。

图中 KA1、KA2、KA3 为电流继电器，其线圈串接在电动机的转子电路中，调节它们的吸合电流相同，而积放电流不同，其中 KA1 释放电流最大，KA2 释放电流次之，KA3 释放电流最小。KA4 为中间继电器，KM1 ~ KM3 为短接电阻接触器，KM4 为线路接触器。

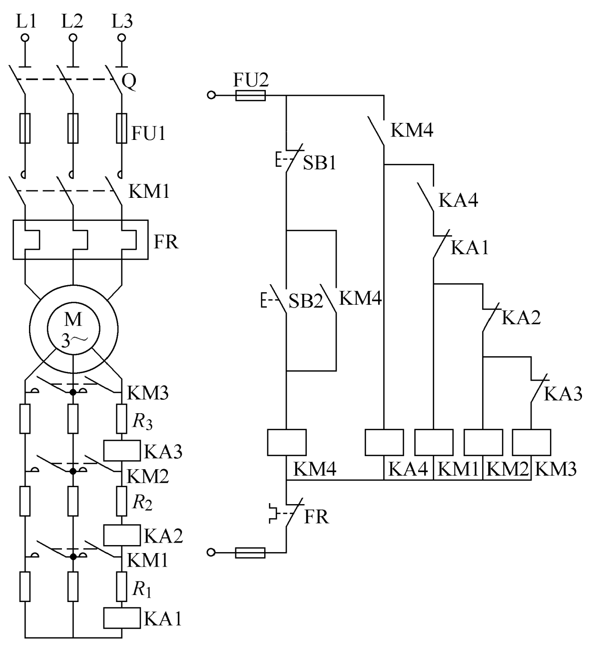


图 2-21　电流原则短接电阻的起动电路

电路工作情况：合上电源开关 Q，按下起动按钮 SB2，KM4 线圈通电自锁，

电动机接通三相交流电源，转子串入全部电阻接为星形起动。同时 KM4 通电，为 KM1 ~ KM3 通电工作作准备。由于起动电流大，KA1 ~ KA3 吸合电流又相同，故同时吸合，其常闭触头断开，使 KM1 ~ KM3 处于断电状态，转子电阻全部串入，达到限流和提高起动转矩的目的。随着电动机的转速升高，起动电流逐渐减小，当起动电流减小到 KA1 释放电流 I_1 时，KA1 首先释放，其常闭触头复位闭合，使 KM1 通电，KM1 主触头短接一段转子电阻 R_1，由于转子电阻的减小，转子电流增大，起动转矩加大，电动机的转速加快上升，又使电流下降。当降至 KA2 释放电流 I_2 时，KA2 通电，其主触头短接第二段转子电阻 R_2，于是转子电流上升，起动转矩加大，电动机的转速又上升，如此继续，直至转子电阻全部切除，电动机的起动过程才结束。

二、转子绕组串联频敏变阻器起动

转子绕组串联电阻起动，分段切除电阻所需要的开关设备较多，维护麻烦，控制箱体积较大。另外，分段切除电阻会引起电流及转矩突然增大，产生一定的机械冲击。近年来，采用转子串联频敏变阻器替代转子串联电阻起动，是绕线转子电动机比较理想的起动方法。常用于 300kW 及以下的 380V 低压绕线转子电动机的起动控制。

1. 频敏变阻器

频敏变阻器的结构如图 2-22a 所示。它是一个具有铁心的三相电抗器。铁心用 30 ~ 50mm 厚的铸铁或厚钢板叠成，在铁心上套有三相线圈，成星形联结，起动时，它与转子三相绕组相连。

电动机在起动时，频敏变阻器的线圈通过转子上的三相交变电流。由于变阻器的铁心由厚钢板制成，故在铁心中产生较大的涡流损耗和少量的磁滞损耗，这就相当于转子回路中串联着一个等效电阻 R。而且此电阻 R 的大小随转子电流频率的变化而变化。电动机刚起动时，转子电流的频率 $f_2 = f_1$ 比较大。这时，频敏变阻器的等效电阻值较大。这样相当于转子回路中串联一个电阻起动。电动机起动后，转速升高，$f_2 = sf_1$ 随之下降，频敏变阻器的涡流损耗及其等效电阻也自动减小。相当于转子回路自动切除电阻，既限制了起动电流，又获得了大致恒定的起动转矩，实现了平滑无级的起动。频敏变阻器的名称也由此而得。电动机的机械特性曲线如图 2-22b 所示。

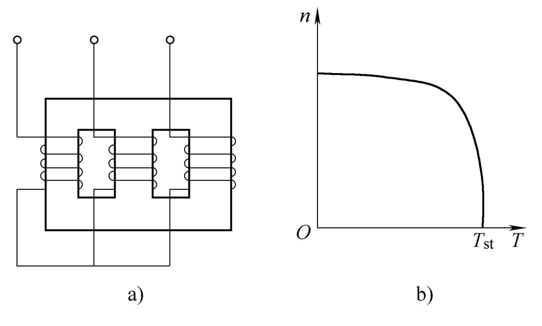


图 2-22　频敏变阻器的结构和机械特性
a）结构　b）机械特性

现在，频敏变阻器已形成系列产品——BP 系列。常用的有 BP1、BP2、BP3、BP4、BP6 等，在不同负载，不同场合使用，可查阅有关手册。

2. 频敏变阻器起动控制电路

由接触器、频敏变阻器、按钮及保护电器组成的起动控制柜（箱）在厂矿的电动机中应用已很广泛，现仅以 TG1-K21 型控制柜为例，来说明它的控制原理及过程。它用来控制低压 45 ~ 280kW 绕线转子电动机的起动，其原理电路如图 2-23 所示。

图中，KM1 为线路接触器，KM2 为短接频敏变阻器接触器，KT1 为起动时间继电器，KT2 为防止 KA3 在起动时误动作的时间继电器，KA1 为起动中间继电器，KA2 为短接 KA3

的中间继电器，KA3 为过电流继电器，HLR 红色信号灯为电源指示灯，HLG 绿色信号灯为起动结束，进入正常运行指示灯，QF 为断路器。

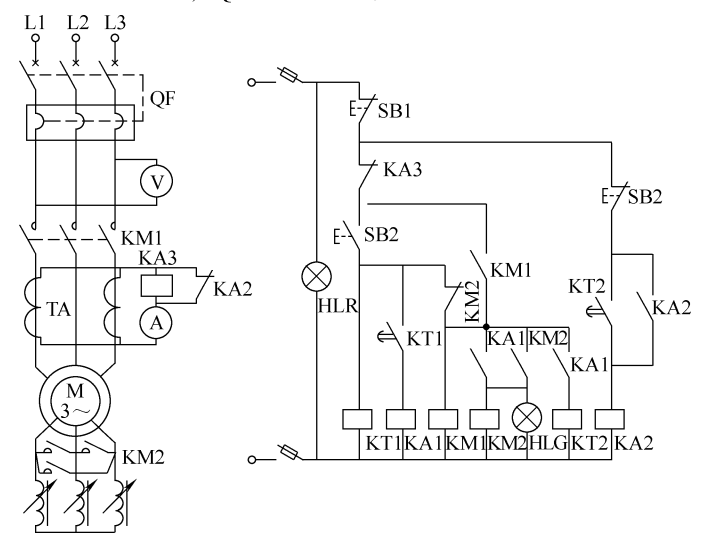


图 2-23　TG1-K21 型控制柜电路图

电路工作情况：合上断路器 QF，HLR 红色信号灯亮表示电源电压正常。按下起动按钮 SB2，KT1、KM1 线圈通电并自锁，电动机定子接通三相电源，转子接入频敏变阻器起动，随着电动机的转速上升，转子电流频率减小，频敏变阻器的等效电阻随之下降。当电动机的转速接近额定转速时，时间继电器 KT1 动作，其触头闭合，使 KA1 线圈通电吸合，KA1 的一触头使 KM2 线圈通电并自锁，同时 HLG 绿色指示灯亮，KM2 主触头将频敏变阻器短接，电动机起动过程结束，KA1 的另一触头闭合，使 KT2 线圈通电吸合，经延时 KT2 动作，对 KA2 线圈通电并自锁，其触头动作，使过电流继电器 KA3 串入定子电路，对电动机进行过电流保护。电动机在起动过程中，KA3 是被 KA2 触头短接的，不致因电动机起动电流过大而使 KA3 发生误动。

时间继电器 KT1 延长时间略大于电动机实际起动时间，一般以大于电动机起动时间 2 ~ 3s 为最佳。过电流继电器 KA3 出厂时的整定电流调节为定子接触器 KM1 的额定电流，在使用时根据电动机实际负载大小再来调整，以便发挥过电流速断保护作用。

第五节　专用起动异步电动机

某些生产机械，要求异步电动机的起动转矩很大，或要求电动机带重载频繁起动。这类机械，用普通笼型异步电动机拖动将达不到要求，若用绕线转子异步电动机拖动，造价又昂贵，维护也复杂。为此，生产实际中又专门设计出适应上述机械需要的各种专用起动电动机。它们属于异步电动机的派生系列产品。这些专用电动机，不仅有较大的起动转矩，而且还适合机械的某些其他要求。这里，介绍几种常见的系列产品。

一、高起动转矩异步电动机（YQ 系列）

一些静止负载或惯性转矩较大的机械，如压缩机、柱塞式水泵、粉碎机等，要求拖动电

动机有很大的起动转矩，YQ 系列电动机就是为此而制造的。

YQ 系列电动机的结构，除了转子的结构有些特殊之外，其他部分和普通电动机一样。

我们知道，如果转子回路的电阻值适量增大，电动机的起动转矩就大，而且起动电流小。但是转子电阻大，电动机运行时的效率就要下降。YQ 系列电动机将转子槽形做成特殊形状，以达到起动时转子电阻大，而运行时转子电阻又自动减小的目的。从而使电动机既有较高的起动转矩，又使其运行效率不致下降。

YQ 系列电动机的转子槽形有两种特殊形状：一种是深槽式，另一种是双笼式。

深槽式转子槽形窄而深，如图 2-24a 所示。槽内仍为铸铝笼型导条。

当转子绕组中有电流时，槽底部分导体交链的漏磁通比槽口部分要多。在电动机起动瞬时，转子电流的频率 $f_2 = f_1$，磁通也以此频率交变。从而转子槽底部分的电抗比槽口部分的大，而且转子电抗值大于转子电阻。这时，转子导体电流密度分布不均匀，电流主要集中在槽口部分流过，如图 2-24b 所示，这种现象称为电流的集肤效应。电流集中在槽口部分流过的效果，相当于减小了导体的有效截面积，如图 2-24c 所示，增加了转子等效电阻。因此，起动转矩增大。当电动机起动完毕，转子电流频率变得很低，集肤效应也不显著了。电流接近均匀分布，转子电阻随之减小，电动机正常运行。

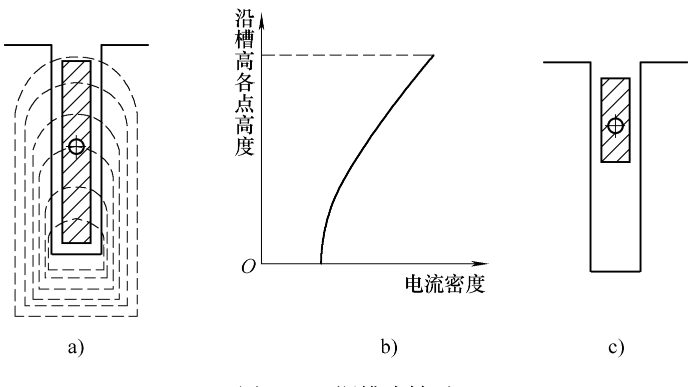


图 2-24　深槽式转子

双笼转子的槽形分上、下两层，如图 2-25 所示。转子绕组形成上、下两套笼。上笼导体截面小，用的是黄铜，电阻大；下笼导体截面大，用的是紫铜，电阻小。上、下笼各有各的端环，有时也合用一个。

由于下笼交链的漏磁通多，所以电抗大；上笼交链的漏磁通少，电抗小。电动机刚起动时，转子电流频率 $f_2 = f_1$，下笼电抗大，电流小，转子电流几乎都集中在上笼。因为上笼电阻大，所以电动机此时可产生较大的起动转矩。可见，上笼在起动时起主要作用，称为起动笼。

电动机起动完毕后，转子频率很低，电抗小，此时转子电阻起主要作用。而下笼电阻比上笼小，故转子电流集中在下笼流过。可见电动机运行主要靠下笼，故称为运行笼。

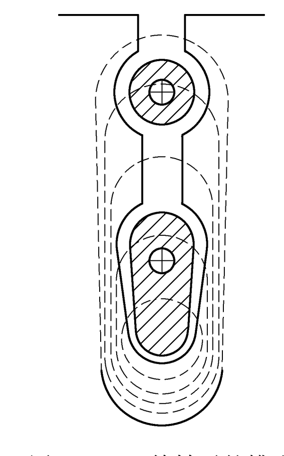


图 2-25　双笼转子的槽形

改变上、下笼的参数关系，即可得到所需要的起动转矩。比深槽式转子的起动性能要好。当然，它的结构及制造工艺要

复杂些。

二、起重、冶金用异步电动机（YZ 系列）

YZ 系列异步电动机，主要用于驱动一般起重机械或冶金用吊车及辅助设备。此类电动机必须能承受频繁起动、制动、过载、反转、超速、冲击和振动等，而且能在金属粉尘与高温的环境下正常工作。

为适应频繁的起动要求，YZ 系列电动机的转子虽然也是笼型，但是转子导条是用电阻率较大的硅、铝合金或铝、锰合金压铸而成。以提高转子电阻，增加起动转矩，降低起动电流。此外，为缩短起动时间，降低起动温升，该电动机的外形略呈细而长，转子的转动惯量较小。

为适应较严重的机械振动、冲击和超速，电动机的定、转子均有较高的机械强度。机座用高强度铸铁或钢板制成。此外，设计时，通过调整结构参数，使其有较高的过载能力。

起重用 YZ 系列电动机，一般采用封闭式外壳。而对冶金用 YZ 系列电动机，为防止金属粉尘进入电动机，它的防护能力要求得更高。而且，为承受在高温下工作，电动机绕组的绝缘都采用 H 级。实践中，对上述电动机一定要注意分别选用。YZ 系列电动机的功率一般在 30kW 以下，在电网许可的情况下尽可能地全压起动。另外，它的工作定额多数为断续式，以增大功率输出。起重用电动机的负载持续率为 25%；冶金用电动机的负载持续率为 40%。

三、辊道异步电动机（YG 系列）

YG 系列电动机，主要用于轧钢机前后的工作辊道和传送辊道。使用场合温度较高，金属灰尘较多。要求此类电动机能承受频繁起动，经常正反转和反接制动（后面专门介绍），以及较大的振动和冲击。为此，YG 系列电动机的笼型转子也用电阻率较高的铝锰合金铸成。导条的截面积比一般电动机略小，以提高转子电阻值，具有较高的起动转矩。

此外，为加强它的机械强度和散热能力，它的机座和端盖用铸铁制成，机座呈八角形，并铸有与转轴垂直的若干环状散热筋。端盖表面也有辐向加强筋。外型如图 2-26 所示。

为适应环境和工作条件的需要，绕组也采用耐热较强的 H 级绝缘，轴承以二硫化钼润滑剂润滑。

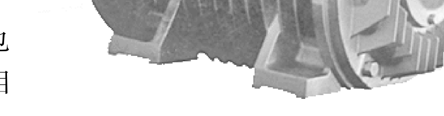


图 2-26　辊道用异步电动机

YG 系列电动机若用于驱动工作辊道，需要正、反转和反接制动，一般以断续定额的方式使用，以连续定额方式使用时，按额定功率选用；以断续定额方式使用时，则按起动转矩和指定的负载持续率选用。

四、高转差率异步电动机（YH）**系列**

YH 系列电动机主要用来拖动压力机、锻压机、剪床或其他类似设备，以及起动和反转较频繁的机械上。

此类电动机的结构和外形尺寸与普通电动机基本相同。因为对它不仅要求较高的起动转矩[$T_{st}=(2.2\sim2.5)T_N$]，较低的起动电流[$I_{st}=(4\sim6)I_N$]，而且还要求运行起来有较大的额定转差率[$s_N=(8\sim12)\%$]和较软的机械特性。因此，它的特殊结构主要是，转子采用高电

阻铝合金导条并减小截面积，以增加其电阻而获得上述特性。

由于它的机械特性软，可在低速下稳定运行，所以它在拖动冲击性负载时，能使被拖动设备的飞轮释放出储存的动能。

需要指出，YH 系列电动机一般为断续性定额。在额定负载下，负载持续率为 15%、25%、40%、60% 四种。

五、力矩异步电动机（YLJ 系列）

YLJ 系列电动机主要在金属加工、造纸、化工、电线电缆、纺织等行业作为卷绕、堵转、导辊和调速等设备的动力。

这类电动机不仅要具有较好的起动性能，而且在运行时从接近同步转速直至近于堵转为止，都能稳定工作。负载转矩增大时，它还能自动降低转速，增加输出转矩。它的容量是用轴上输出的转矩（N·m）来标志，故称为力矩电动机。

它的机械特性按用途分两类：近似卷绕特性（恒功率）和近似导辊特性（恒转矩），如图 2-27 所示。

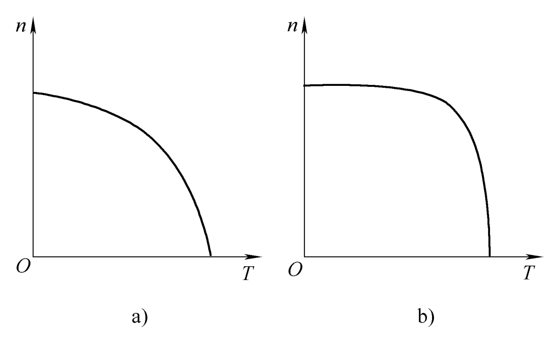


图 2-27　力矩电动机的机械特性

a）近似卷绕特性　b）近似导辊特性

为获得上述特性，力矩电动机在结构上主要是通过增加转子电阻实现的。它的笼型转子导条通常用电阻率较高的 H62 黄铜制成，或者整个转子用实体钢铸成，使转子电阻值等于或略大于电动机的电抗值，以便在电动机堵转或反转时阻抗值最大。采用不同的导条，可以得到不同斜率的机械特性。

由于转子电阻高，损耗大，产生的热量也大，特别在低速运行和堵转时更为严重。所以，电动机的绝缘用耐热性较好的 E、H 级绝缘，其外壳一般采用开启式结构，转子具有轴向通风。输出较大的力矩电动机还装有鼓风机，强迫通风冷却。其他结构与一般电动机相同。

由于力矩电动机以堵转时输出转矩的大小为额定值而分为不同的规格。所以选用时要注意和普通电动机的区别。

第六节　三相异步电动机的调速

电动机的调速是指它所带负载不变的情况下，人为地改变某些条件，使电动机在不同的转速下运行。对异步电动机，根据转速公式：

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1(1-s)}{p}$$

可知，若调节异步电动机的转速，通过改变电动机的转差率 s，或电源 f_1，或电动机的磁极对数 p 等即可实现。此外，还可以在异步电动机上附加某种变速或减速机构，也能达到调速的目的。

近年来，极幅调制原理的发展和大功率晶闸管的应用，使异步电动机的调速有了很大的突破和进展。本节主要介绍异步电动机常用的几种调速方法。

一、改变转差率调速

改变转差率，即调节电动机的转速，现在采取的措施有改变电源电压 U_1、调节转子电阻值、转子回路中串接附加电动势（串级调速）等。下面分别介绍它们的原理和方法。

1. 改变电源电压 U_1 调速

改变电源电压 U_1，异步电动机的电磁转矩随 U_1^2 而改变。对应于不同电压的机械特性，见图 1-9a。从机械特性曲线上就可直观的得到，在负载转矩 T_L 一定的情况下，均匀改变 U_1，即可使电动机的转速不同，如图 2-28 所示。图中，$U_1 > U_1' > U_1''$时，则 $n_1 > n_1' > n_1''$。从机械特性曲线中还可得知，转子的电阻值越大，电动机的机械特性曲线越软。而机械特性曲线越软的电动机，变压调速的范围就越大。因此，变压调速对转子为高电阻的笼型电动机和转子回路串联电阻的绕线转子电动机比较适用。

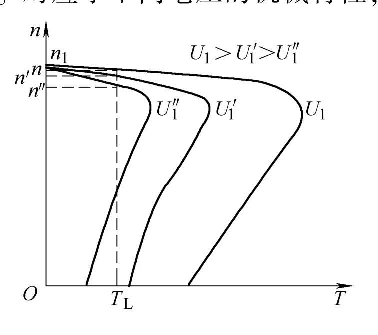


图 2-28 变压调速机械特性

在实际生产中，常用两种变压措施。

一种是自耦变压器变压。这种方法虽然简单方便，但缺点是设备较大，而且当负载一旦有波动时，电动机的转速就不太稳定，自动调整控制也不太方便。

另一种是晶闸管自动调压装置，此方法克服了前种调压的缺点。调压线路原理如图 2-29 所示。

改变给定信号，使触发器的触发脉冲移相，进而改变晶闸管的导通角。使加在电动机定子绕组上的电压改变，达到电动机调压的目的。对于负载波动所引起的转速变化，用测速发电机进行速度负反馈，自动实现速度调整稳定的要求。

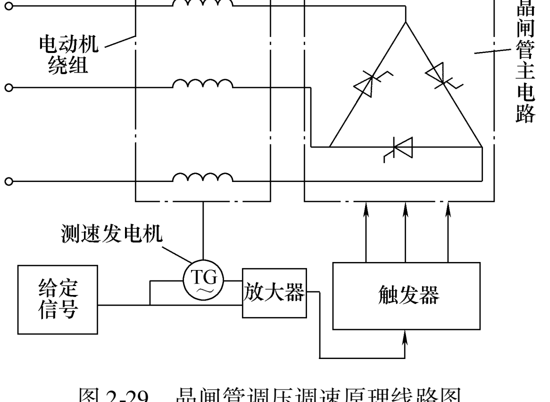


图 2-29 晶闸管调压调速原理线路图

由于电动机在低速运转时的功率因数和效率较低，而且电动机容易过热，使用此类方法进行电动机调速时应注意。

2. 改变转子电阻调速

对绕线转子异步电动机，改变转子回路的外接电阻值即可调节电动机的转速，如图 2-30 所示。转子电阻越大，机械特性曲线越向下偏，在负载转矩一定的情况下，电动机的转速越低。

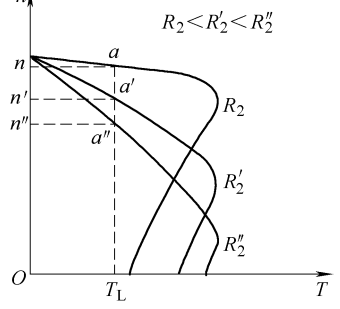


图 2-30 转子回路串联电阻调速

调速的物理过程如下，当转子回路中的外接电阻增大时，由于机械惯性作用，电动机的转速不能突变。但转子电流随其电阻的增大而减小，因而电动机的电磁转矩及电磁功率下降。因为负载转矩一定，原来的转矩平衡受到破坏，电动机开始减速。转速的降低又使转子电流重新上升，电磁转矩又逐渐恢复到原来值，即和负载转矩达到新的平衡，这时电动机在新的转速下稳定运行，实现了调速的目的。接在转子回路中用来调速的变阻器

与起动变阻器相似。不过，它是按长期使用的发热条件设计的。

这种调速方法，电动机带的负载转矩越大，调速范围就越大。

转子串联电阻调速有一个突出的缺点，那就是外接电阻使电动机的铜损耗增加，电动机的效率下降。但此方法调速简单、方便，故在小型异步电动机（例如起重机）中仍广泛应用。

3. 串级调速

针对绕线转子电动机转子回路串联电阻调速的缺点，提出了串级调速的方法。这种方法就是用一个或几个辅助电动机或电子设备串级连接在电动机的转子回路中，将原来调速中损失在外串电阻中的那部分能量加以利用或者回收到电网中，既达到调速的目的，又能提高电动机运行的效率。

串级调速的种类很多。但是，无论哪一种，都是以一个附加电动势的形式串在电动机的转子回路中进行调整的。串入的这个附加电动势与转子电动势 E_{2p} 在任何转速下都保持同频率和同相数，或者将它们均变为直流电动势。只有这样，附加电动势才能起到调速的作用。这里，以转子回路与晶闸管逆变器的串级调速为例，说明其调速的原理及过程。

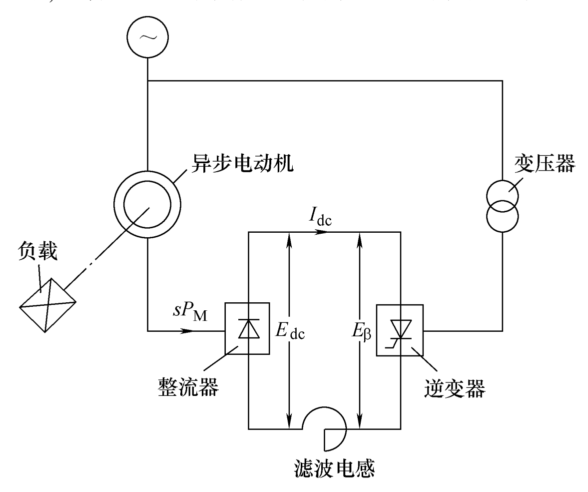


图 2-31　串级调速的线路原理图

图 2-31 所示为这种调速的线路原理图。图中整流器的作用是将电动机转子的电动势、电流变为直流，经滤波电感后，再由逆变器将直流变为交流，通过变压器送回电源。逆变器有两个作用，一是给电动机转子回路提供一个附加电动势（直流电势 E_{dc}）；二是将转子回路的等效铜损耗功率 $P_{Cu2}=sP_M$ 大部分送回电网，不再使其损耗掉。

异步电动机旋转时，转子的电动势 $E_{2p}=sE_2$。E_{2p} 经过三相整流器变成直流电动势 E_{dc}，它的大小为

$$E_{dc}=K_1E_{2p}=K_1sE_2$$

式中　K_1——整流系数。

由晶闸管逆变原理可得，逆变器直流侧的逆变电动势 E_β 为

$$E_\beta=K_2U\cos\beta$$

式中　K_2——逆变器的逆变系数；

U——逆变器交流侧变压器的二次侧相电压；

β——逆变角。

在直流回路中（见图 2-31），直流电流 I_{dc} 为

$$I_{dc}=(E_{dc}-E_\beta)/R$$

式中　R——直流回路的等效总电阻。

因为 R 很小，忽略不计，于是可得

$$E_{dc} - E\beta \approx 0$$

即

$$E_{dc} = E_{\beta} = K_1 s E_2 = K_2 \cos\beta$$

当整流器和逆变器都用三相桥式电路时，有 $K_1 = K_2$，可得

$$s = \frac{U}{E_2}\cos\beta$$

从上式看出，改变逆变角 β，就能改变异步电动机的转差率 s。β 角增大，s 减小，β 角减小，s 增大，它们之间按余弦规律变化。β 的变化使 s 改变，可实现调速的目的。

串级调速的优点是调速范围宽，效率高。适用于大容量绕线转子异步电动机的调速。随着晶闸管变流技术的不断发展，此种调速方法的应用日益广泛。

二、变频调速

改变电源的频率 f_1，电动机的同步转速 n_1 与 f_1 成正比变化，转子的转速 n 也随之变化。因此，若均匀调节频率，即可平滑地改变电动机的转速，这种方法称为变频调速。

但是，电源频率的变化，在电源电压一定的情况下，将使电动机的主磁通 Φ 变化，使电动机的空载电流 I_0、功率因数 $\cos\varphi$ 及效率 η 均受到影响。所以，变频调速时，一定要使电动机的主磁通 Φ 不变。

从异步电动机的定子电压平衡方程式可知，如果保持主磁通 Φ 不变，在变频的同时，应使电源电压 U_1 也成比例的变化，即

$$\frac{U_1}{f_1} = 4.44 k_{N1} N_1 \Phi = 常数$$

根据理论分析和实践知道，电动机在带恒转矩负载调速时，U_1 和 f_1 成正比变化，在带恒功率负载调速时，U_1 必须随 f_1 的开平方成正比变化。

异步电动机的变频调速，必须有专用的变频设备。过去所用的变频设备投资较高，使这种调速的应用受到很大的限制。近年来，随着晶闸管变流技术的发展，为获得变频电源提供了新的途径。

这里，仅以交—直—交晶闸管变频调速系统为例，介绍其调速原理。

此种变频电源是先将电网中的交流电整流成直流电，而后通过逆变器再将直流电逆变为频率可调的交流电源。其中调压部分主要是通过晶闸管整流器来完成。变频调速系统原理如图 2-32 所示。

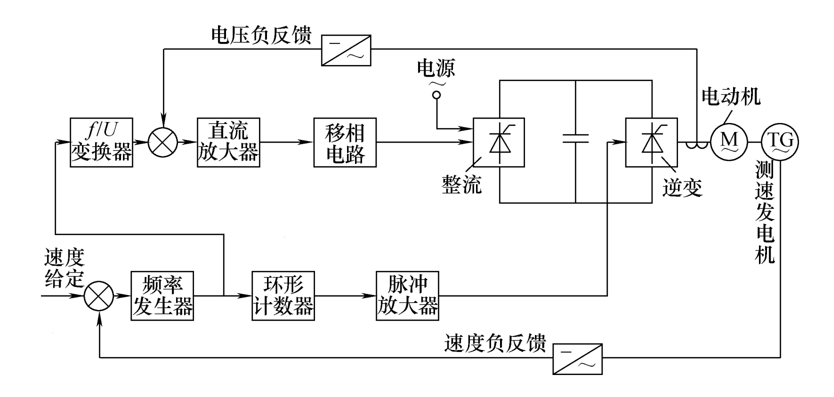


图 2-32　变频调速系统原理示意图

调速时，给定转速电压信号通过频率发生器输出所需频率的触发信号，经过环形计数器分频，再经脉冲放大器放大，顺序触发逆变器中的6个晶闸管。逆变器将直流逆变成一定频率的交流电压送到电动机中，控制速度给定电压信号的变化，逆变器输出交流电压的频率就随之改变，实现了变频调速。

为了实现电压大小与频率变化的协调控制，在变频的同时，相应地改变逆变器的输入直流电压，这是通过频率-电压（U/f）变换器实现的。它将频率发生器的输出频率变成直流电压信号，信号的大小与所需频率成正比，再经直流放大器和移相电路，控制晶闸管整流器的控制角变化，使整流器整流的直流电压（也就是送给逆变器的直流电压）相应变化。

系统中的速度负反馈环节，是为了增强调速后电动机转速的稳定性。电压负反馈环节是为了稳定电动机的协调输入电压。

晶闸管变频调速系统效率高，动态性能好，调速范围宽，自动化程度也很高。目前，此系统还存在一定的缺点。比如电动机低速运行容易过热，控制电路仍然较复杂等。随着科学技术的发展，此种调速方法会不断地改进和完善，将得到广泛的应用。

第七节　专用变速和减速异步电动机

上节介绍的调速方法大多用于普通异步电动机。为了适应生产实际的需要，又设计生产出各种专用变速和减速派生系列的异步电动机。下面介绍几种常用的专用变速和减速电动机。

一、变极多速异步电动机（YD系列）

异步电动机的同步转速 n_1 与电动机的磁极对数 p 成正比，改变 p 即能达到调速的目的。但是，普通电动机的磁极对数是固定的，电动机制成后是不能随意改变的。YD系列电动机是为此专门设计的，通过改变定子绕组接线，就能使磁极对数改变。

此类电动机的转子仍然是笼型，能自动适应定子磁极数的改变。它的定子绕组是根据单绕组变速原理而设计的。制造时，各相绕组按一定比例留有若干抽头。因此，用不同的连接方式即可得到不同的磁极对数。通常，可分为倍极比电动机（即电动机的磁极对数比为整倍数，如2:1），和非倍极比电动机（如磁极对数的比为3:2或4:3等）。这种电动机又分为双速、三速、四速等不同的多速品种。

此处，以YD-2/4极双速电动机为例，简述其变极调速的原理。由于电动机三相定子绕组都相同，所以只取一相分析即可。如图2-33所示为此台电动机的U相绕组。制造时，分它为两部分，每一部分是一相绕组的一半，通常它为半相绕组。图中，每半相绕组用一个绕组元件来表示。

图2-33a中，两个半相绕组 U_1U_1' 与 U_2U_2' 顺向串联，电流由 U_1' 流进，从 U_2' 流出。可以确定，此种绕组电流所产生磁极为4极。图2-33b中，将两个半绕组并联起来，则电流由 U_1、U_2' 流进，从 U_1'、U_2 流出。第二个半绕组电流方向和前者相反。可以确定，此时电流所产生的磁场为2极。由此可见，只要同时将三相绕组的每半相绕组电流反向，即可使电动机的磁极数改变。这就是异步电动机变极的原理。

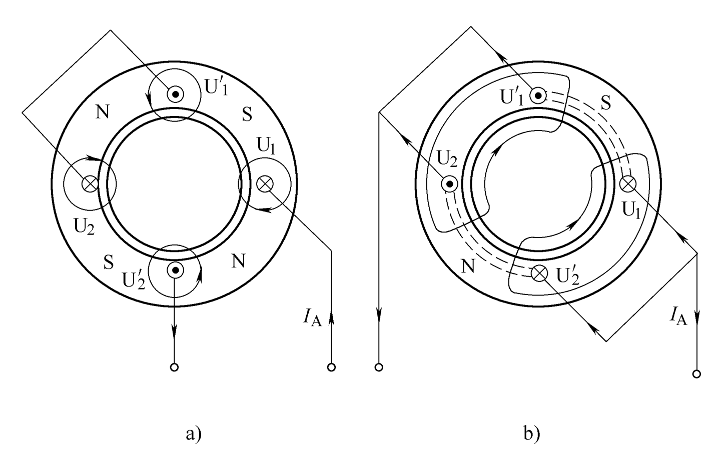


图 2-33　2/4 极双速电动机的变极原理

定子半相绕组电流反向，一般是通过三相绕组端线接线方式的不同来实现的。例如，用 2 Y/Y，2 Y/△或△/2△等换接方式。接线方式不同，电动机将出现不同的调速特性，这取决于工作机械对调速的要求。在此，举两种接线方式供参考。

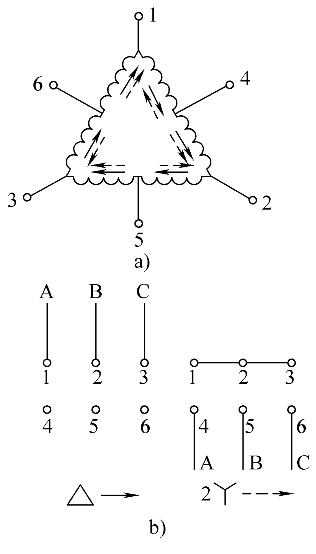


图 2-34　2 Y/△联结法

图 2-34 所示为 2 Y/△双速电动机的接法，△联结法时，每相中的两个半相绕组顺向串联，磁极对数为 p，同步转速为 n_1；2 Y联结法时，每组中的两个半相绕组反向并联，其中半相绕组电流反向，这样，磁极对数则为 $p/2$，同步转速为 $2n_1$。

使用电动机时，无论在哪种转速下运行，为了充分利用电动机，每半相绕组流过的电流都要为设计的额定电流 I_N，而且其功率因数 $\cos\varphi$ 及效率 η 基本不变。则电动机输出的功率和转矩为

△联结法：　$P_{\triangle} = \sqrt{3}U_N(\sqrt{3}I_N)\cos\varphi_1\eta$

$$T_{\triangle} \approx 9550\frac{P_A}{n_1} \qquad n_{\triangle} \approx n_1$$

2 Y联结法：　$P_{2Y} = \sqrt{3}U_N(2I_N)\cos\varphi_1 \cdot \eta = \frac{2}{\sqrt{3}}P_{\triangle} = 1.15P_{\triangle}$

$$T_{2Y} \approx 9550\frac{P_{2Y}}{2n_1} = 9550\frac{\frac{2}{\sqrt{3}}P_{\triangle}}{2n_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}T_{\triangle} = 0.577T_{\triangle}$$

从以上分析可以看出，两种接法时的电动机输出功率比较接近，适合带恒功率负载调速。

图 1-35 所示为 2 Y/Y双速电动机的接法。Y联结法时，每相中的两个半相绕组顺向串联，磁极对数为 p，同步转速为 n_1。2 Y联结法时，每相中的两个半相绕组反向并联，磁极对数为 $p/2$，同步转速为 $2n_1$。

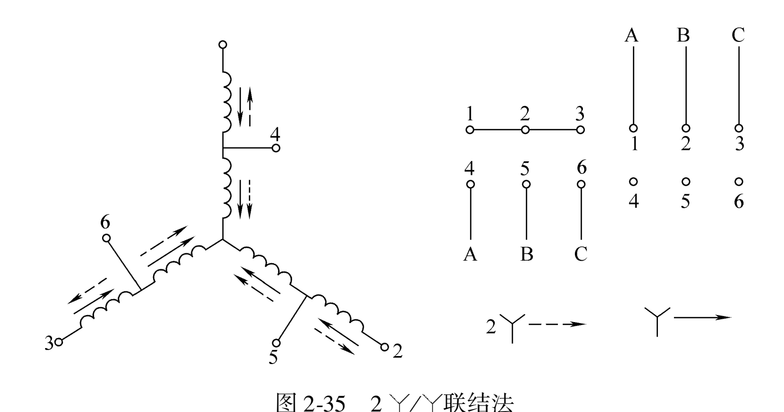


图 2-35　2 丫/丫联结法

使用时，为充分利用电动机，无论调到哪种转速，均使每半相绕组流过的电流为设计的额定电流 I_N，且功率因数 $\cos\varphi$ 及效率 η 基本不变。则电动机输出的功率和转矩为

△联结法：
$$P_{\vee}=\sqrt{3}U_N I_N \cos\varphi_1 \eta$$
$$T_{\vee}=9550\frac{P_{\vee}}{n_{\vee}}\approx 9550\frac{P_{\vee}}{n_1}$$

2 丫联结法：
$$P_{2\vee}=\sqrt{3}U_N(2I_1)\cos\varphi_1 \eta=2P_{\vee}$$
$$T_{2\vee}\approx 9550\frac{P_{2\vee}}{2n_1}=9550\frac{2P_{\vee}}{2n_1}=T_{\vee}$$

从以上分析可知，2 丫/丫联结法的电动机适合带恒转矩负载调速。

还要注意以上两种换接法（2 丫/△和 2 丫/丫），无论怎样换接，由于相序的改变，其高低速的转向相反，为保证电动机中的旋转方向不变，换接的同时，还要改变电源的相序。

这里举例双速异步电动机（丫丫/△联结法）的控制电路，供参考。图 2-36 所示为其控制电路图。图中 KM1 为电动机三角形联结接触器，KM2、KM3 为电动机双星形联结接触器，SB2 为低速起动按钮，SB3 为高速起动按钮，SB1 为停止按钮。

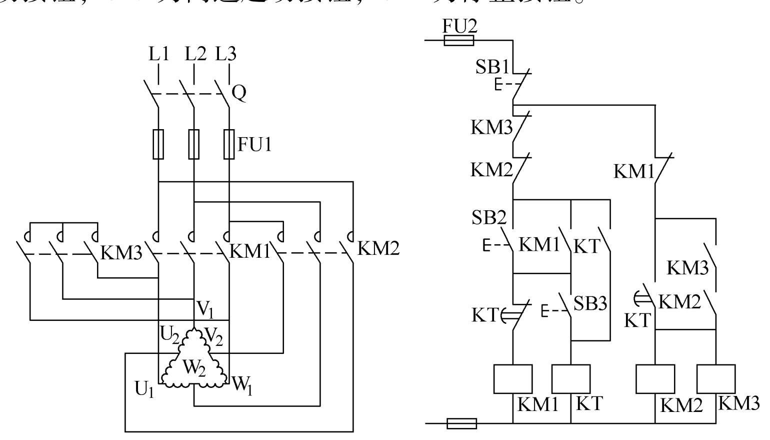


图 2-36　双速异步电动机控制电路

电路的工作过程：合上三相电源开关 Q，接通控制电路电源。需要低速运转时，按下低速起动按钮 SB2，接触器 KM1 线圈通电并自锁，KM1 主触头闭合，电动机定子绕组作三角

形联结，电动机低速运行。

当需高速运转时，按下高速起动按钮 SB3，KM1 线圈断电释放，其常开主触头与辅助触头断开，常闭触头闭合，当 SB3 按到底时，KM2、KM3 主触头闭合，将电动机定子绕组接成双星形联结，电动机以高速旋转。此时，因电源相序改变（接线时故意将相序改变），电动机转向和低速时相同。

若在高速运行时，按下低速起动按钮 SB2，又可使电动机由高速运转改为低速运转，但转向仍不变。

若按下停止按钮 SB1，接触器断电释放，电动机停转。

YD 系列电动机的调速等级尽管有限，但是它使拖动机械的变速机构得到了简化。而且它的机械特性较硬，效率较高，操作又简单方便。因此在很多机械上获得了应用。

二、电磁调速异步电动机（YCT 系列）

YCT 系列电动机是普通笼型电动机与电磁转差离合器构成的一种组合体。其结构如图 2-37 所示，它的调速主要靠电磁转差离合器来实现。

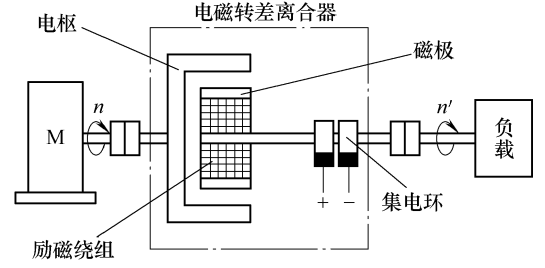


图 2-37　电磁调速电动机结构示意图

电磁转差离合器由电枢和磁极两部分组成。两部分没有机械联系，都能自由旋转。电枢一般用整块铸钢构成，形状呈环形，与异步电动机同轴连接，由电动机带动它旋转，称为主动部分。磁极由铁心和励磁绕组构成，磁极多采用爪极形式，互相交叉地安装在轴上，其间用非导磁材料连接，磁极与工作机械（负载）相连，称为从动部分。磁极上的励磁绕组通过轴上的集电环和电刷与直流电源接通。

当离合器上的励磁绕组通以直流电流时，沿气隙圆周面的各爪极将形成若干对 N、S 交替的磁极。离合器的电枢随电动机旋转，电枢和磁极之间就有相对运动。从而使电枢感应出涡流。此涡流与磁场互相作用产生转矩，使磁极跟着电枢同一方向旋转，带动工作机械一同旋转。但其转速低于电枢的转速。

由于异步电动机的机械特性较硬，电枢的转速几乎恒定不变。而磁极的转速则由磁极的磁场强弱而定，即由励磁电流的大小确定。改变励磁电流的大小，磁极与电枢的转差就相应变化，工作机械的转速即能得到调节。励磁电流的大小可任意改变，电动机输出的转速可以无级调节。此类电动机的调速一般可达到 10∶1，由于它属于转差调速方式，所以又称它为滑差电动机。

目前，YCT 系列电动机输入的直流电，一般来自晶闸管整流电路。通过控制信号，改变晶闸管的导通角，可方便地改变直流电压及电流，实现调速的目的。另外，还利用速度负反馈环节（和前面所述的调速系统一样）来自动稳定调节后的速度。

YCT 系列电动机结构简单，运行可靠，调速范围宽且平滑。适用于纺织、化工、造纸、水泥等行业的恒转矩和风机类型的负载。

三、机械减速异步电动机（YCJ 和 YXJ 系列）

机械减速异步电动机是由普通笼型异步电动机和机械减速装置所组成。它能稳定地输出低转速大转矩，作为低速机械设备的动力。最常用的机械减速装置有齿轮减速器和摆线针轮

减速器。

齿轮减速异步电动机（YCJ 系列）的典型结构如图 2-38 所示。它的减速器有两对齿轮，为二级减速。

此系列电动机有十几种减速比，配套电动机以 4 极或 6 极电动机较多。它们的输出转速很低。它还可以制成适合于某种特定环境下使用的专用型号电动机。

此类电动机只能减到某种需要的转速，不能调节转速。

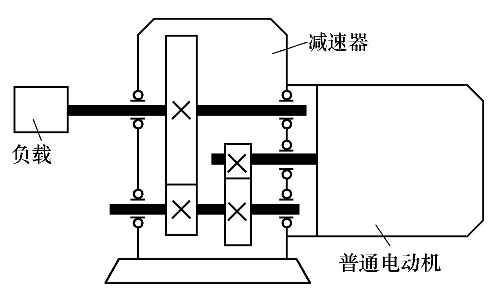


图 2-38　齿轮减速异步电动机的典型结构

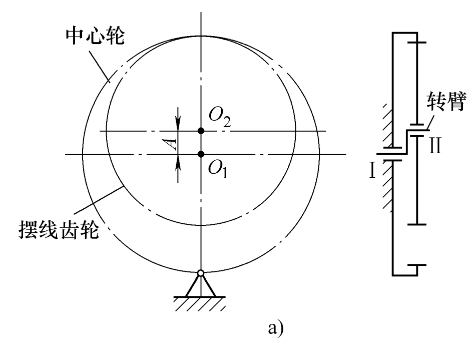
摆线针轮减速异步电动机（YXJ 系列）的转速器用的是摆线针轮行星传动机构，具有减速比大、效率高、体积小、重量轻、运行稳定、能承受过载冲击等优点。输出转矩可高达 37000N · m 左右。

摆线针轮行星传动机构主要由中心轮、转臂和摆线轮等基本部件组成。摆线针轮行星传动的原理如图 2-39a 所示。

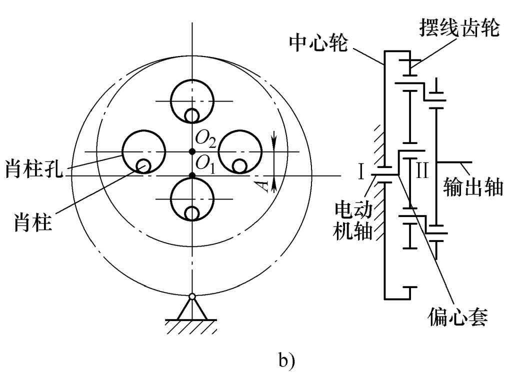
外圈为一个固定的内齿轮，又名中心轮，图中以圆心 O_1 和轴心 I 表示，齿形为针状圆柱。与之相啮合的是一个摆线齿轮，亦称星齿轮，图中以圆心 O_2 和轴线 II 表示，齿形呈短幅外摆线的等距曲线。O_1 和 O_2 的间距为转臂的偏心距 A。

电动机旋转时，它的轴通过与其相连接的偏心套使摆线齿轮沿着固定的内齿轮滚动，对轴线 I 公转，同时对自身的轴线 II 作与公转方向相反的自转。通常，摆线齿轮的齿数比内齿轮的齿数少一个。根据行星传动的原理，电动机每转一转，摆线齿轮就后退一个齿距。如果摆线齿轮的齿数为 Z_B，则传动比为 $-1/Z_B$（负号表示其转向与电动机相反）。

图 2-39b 表示由电动机轴的高速运动，通过摆线轮等中间环节，转化为输出轴的低速运动示意图。



a)



b)

图 2-39　摆线针轮行星传动原理示意图

a）行星传动原理　b）行星传动示意图

为了使轴保持平衡和便于拆卸，电动机轴上装有两个相位互差 180°的偏心套（图 2-39b 中只画出一个）。在偏心套上分别装有一个形状完全相同的摆线齿轮。在偏心套和摆线齿轮间装有滚动轴承，以减少相互之间的摩擦损耗。在输出轴的构件上，固定着若干个以等弧距分布的肖柱和肖套，分别插入两个摆线轮端面上对应的圆孔中。电动机旋转时，迫使摆线针轮作复杂的平面运动，并通过圆孔对肖柱的运动（类似曲柄运动），将摆线轮的低速反转向运动传递给输出轴。摆线齿轮上的孔径与肖

柱之差等于偏心距的两倍，以保证摆线轮作偏心运转时，肖套与孔的内圆面永远保持接触。

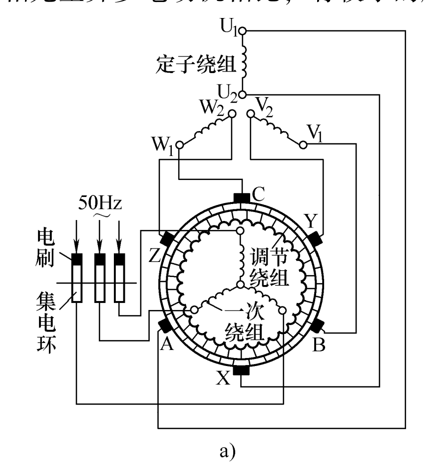
YXJ 系列电动机主要用于驱动各种低速运转的机械，在轻工、化工、建工、纺织、运输等部门广泛应用。

四、三相换向器变速异步电动机（YHT 系列）

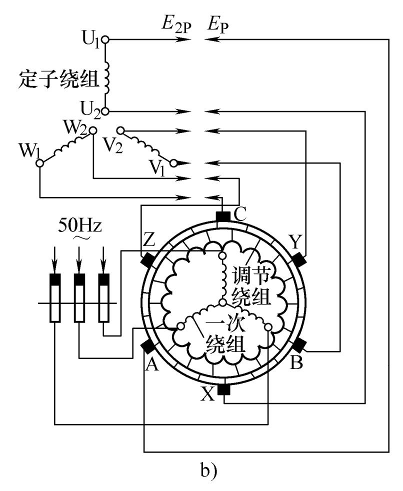
三相换向器变速异步电动机（简称换向器电动机），是一种恒转矩交流无级变速电动机。它具有调速范围广、功率因数高等优点。和一般三相笼型异步电动机相比，有较小的起动电流和较大的起动转矩，但满载效率偏低，与电磁调速异步电动机相比，它不仅能在空载情况下进行调速，而且调速范围更大。其调速性能指标与并励直流电动机相仿，它的主要缺点是结构较复杂，维修较麻烦。

1. 结构特点

换向器电动机相当于一台反装式绕线转子异步电动机（即三相交流电源接入转子绕组），和一台换向器变频机的混合体。图 2-40 所示为其结构图。



a)



b)

图 2-40　三相换向器电动机等效结构图

a）换向器电动机原理结构图　b）变频换向器等效结构图

转子是它的一次侧，转子槽内嵌放两个绕组：图 2-40a 左侧是三相初级绕组，采用双层短距线圈，嵌放在槽内底部，它可接成三角形或星形联结，通过三只集电环和三相电源相连；右侧是一个和换向器相连的调节绕组，嵌放在转子槽内的顶部；上侧是定子绕组，为电动机的二次侧。定子绕组是多相双层或单层绕组，其相数 m_2 由电动机的功率和换向情况决定。一般选用 3、4、5、6 或 7 相数种。每相定子绕组的始末两端和换向器上的两组电刷引出线相连接。换向器上安放两套可以向相反方向移动的电刷转盘。转动手轮带动电刷转盘，可以改变调节绕组同相间的夹角，定子每相所连接的两个电刷也可以同时沿转换器移动位置。

2. 工作原理

（1）调节绕组的电动势和频率

转子的初级绕组通入三相交流电流后，便产生旋转磁场，每极主磁通为 Φ。假定磁场相当于转子以转速 n_1 逆时针方向旋转，图 2-41a 所示。此时，定子一相绕组 U_1U_2 所连接的电刷 A 和 X 间夹角 $\alpha=0°$，即电刷 A 和 X 重合，将定子绕组短接，则旋转磁场力图拖动定子朝同一方向转动，但是定子是固定不动的，因而转子沿顺时针方向（和旋转磁场旋转方向相反）转动。旋转磁场对转子的转速与转子转速无关，但是它对空间的转速却与转子转速有关，即 $n_2=n_1-n$。这样，定子绕组电动势 E_{2p}的频率为 $f_2=sf_1$。

当定子绕组所连接的电刷 A 和 X 从定子绕组 U_1U_2 的空间轴线上向两边各拉开 α 角时，如图 2-41b 所示，因移刷后两个电刷在空间的位置是不动的。当转子转动时，旋转磁场在刷间的调节绕组中感应电动势 $\dot{E}_k$。在任何转速下，$\dot{E}_k$ 总是和定子绕组电势 $\dot{E}_{2p}$同频率同相位，

而且两者的频率随转子的变化而变化。调节绕组在电刷间的电动势 $\dot{E}_k$，其大小决定于两电刷展开的角度 2α，与转速 n 无关。

（2）速度调节

图 2-41b 中所示的闭合回路中，$\dot{E}_k$ 和 $\dot{E}_{2p}$ 方向相反。图 2-41c 所示为将每相的两个电刷交叉方向展开同一角度 2α，此时 $\dot{E}_k$ 和 $\dot{E}_{2p}$ 方向相同。以上两种情况下，定子每相绕组回路的合成电动势为 $E_k + E_{2p}$，产生的电流为

$$I_2 = \frac{E_k + E_{2p}}{|Z|}$$

式中，$|Z|$为定子绕组和电刷间调节绕组的总阻抗的模。由于转差率很小，阻抗压降 $I_2|Z|$较小，忽略不计，于是：

$$E_{2p} = sE_2 = \mp E_k$$

得
$$s = \mp\frac{E_k}{E_2} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

即
$$n = (1 \pm \frac{E_k}{E_2})n_1$$

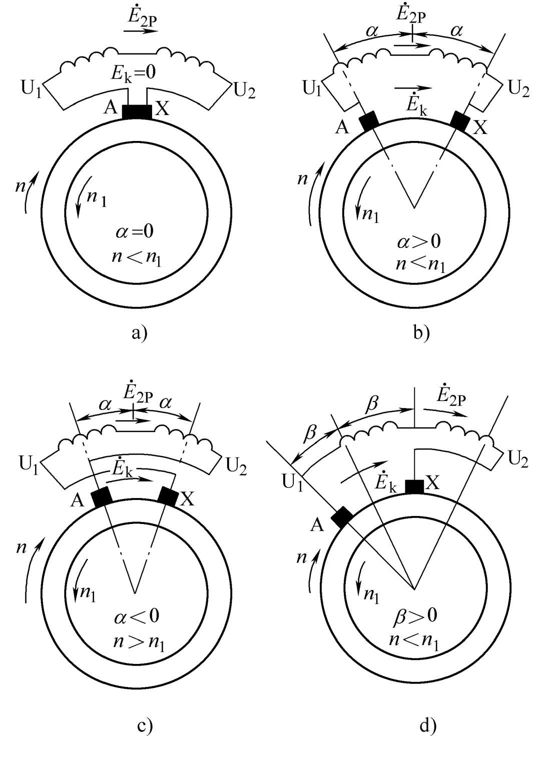


图 2-41 移动电刷位置调节转速和功率因数

上式表明，电动机的转速 n 可用定子绕组中接入附加电动势 E_k 来调节。当电刷间的调节绕组中点与定子绕组组轴线重合时，$\dot{E}_k$ 和 $\dot{E}_{2p}$同相位。若 $2\alpha > 0$，$\dot{E}_k$ 在电路中与 $\dot{E}_{2p}$ 反向，在式中取“－”号，电动机的转速降低，并且 $n < n_1$；如果 $2\alpha < 0$，电刷交叉展开，$\dot{E}_k$ 在电路中与 $\dot{E}_{2p}$同向，在式中取“＋”号，电动机的转速升高，且 $n < n_1$。移动电刷位置，改变$|2\alpha|$的大小，可以调节 $\dot{E}_k$ 的大小。$|\alpha|$越大，$\dot{E}_k$ 的值越大，转速变化也越大。若调至 $E_k = E_2$，则电动机的调速范围为 $0 \sim 2n_1$。最高转速可达同步转速的 2 倍，最低转速为 0。若 $\alpha = 0$，$E_k = 0$，这时它和普通反装式异步电动机一样，以低于同步转速的速度运行。

（3）功率因数的调节

从理论分析结果可知道，在电动机低速运行时，若将每相定子绕组所连接的两电刷同时逆转子转向移动 β，如图 2-41d 所示。则 $-\dot{E}_k$ 对电动机起着增磁作用。这使电动机从电网吸收的感性无功电流减小，从而提高了电动机的功率因数，如果顺转子的转向同移动电刷一样，则电动机功率因数反而下降。所以，实际使用时，对不任意改变转向的换向电动机，在低速运行情况下，均逆转向转动电刷来改善电动机的功率因数。

3. 使用和维护要点

换向器电动机应在最低额定转速的调节位置情况下直接起动。备有离心式鼓风机的电动机，鼓风机应按指定的方向和电动机同时运转。

停机时，切断电源以后，应将电刷转盘缓慢地恢复到最低转速位置。对于最大功率在 55kW 以上，具有功率因数补偿的换向器电动机，拖动惯量较大的机械负载（如鼓风机）时，应在电动机惯性转速小于同步转速后，才能移动电刷盘。否则会引起电动机的自励发

电，造成绕组匝间绝缘击穿。

换向器电动机具有恒转矩特性。它的功率随转速成正比变化。铭牌上标的初级电流，往往只有相当于最大和最小额定功率的两个额定值。它们的范围较大，不能衡量电动机在其他转速下的负载情况。在整个调速范围内，其次级的满载电流保持不变。所以，要测量次级电流的大小，才能判断电动机是否过载。

第八节　三相异步电动机的制动

根据被拖动机械的需要，对异步电动机提出制动的要求，所谓制动，主要包括：切断电源后要求电动机迅速停止转动；电动机在运行中要迅速减速，吊车用电动机在下放重物过程中需要维持下放的转速不能过高等。

对普通用异步电动机，常采用以下几种制动方法，即再生发电制动、反接制动、能耗制动、自励发电制动和机械制动等。本节主要分析上述各种制动方法的原理和特点，供实际中选择参考。

一、再生发电制动

异步电动机带着一般负载运行时，电动机的转向和机械负载的转矩方向是相反的。但是在特殊情况下，如变极调速电动机，当电动机从少极数（p）变换到多极数（$2p$）时，旋转磁场的转速降低到原来的转速的一半（n_1'），这时电动机原来的转速 n_A 大于旋转磁场转速 n_1'。于是电动机的定、转子电流及电磁转矩均与原来的相反，电动机此时处于发电状态，电磁转矩具有制动运转的性质，驱使电动机迅速减速到 n_B 稳定运行，此过程称为电动机的再生发电制动，如图 2-42 所示。

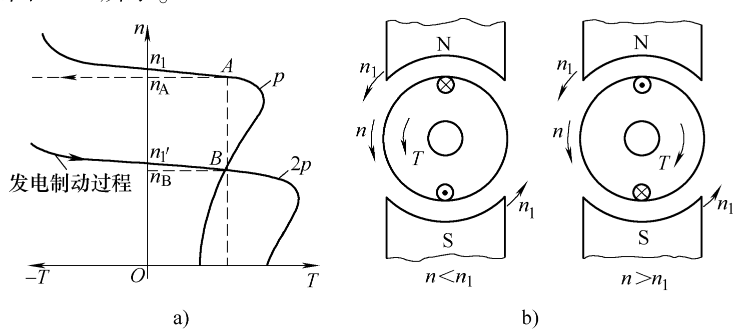


图 2-42　再生发电制动

发电制动属于异步电动机的一种特殊运行状态，一般不需要另外的装置和接线。但是使用这种制动有一个条件限制，即必须在 $n > n_1$ 时才行。

二、反接制动

在某种特定情况下，异步电动机的转子旋转方向和其磁场的转向相反。此时，电动机产生的电磁转矩对其转子起制动作用。根据这个作用，对运行的电动机可实现制动。通常，这种制动有两种方式。

1. 电源反接制动

电源反接制动也称电动机的正转反接制动。将正在运行的电动机定子绕组引出线的任意

两相对调，则定子电流相序改变，产生的旋转磁场立即反转。转子由于机械惯性，此时仍按原来方向旋转，于是在转子绕组中产生了与原来方向相反的电流，电动机的电磁转矩作用也相反，即成了制动性的转矩。电动机的转速迅速下降，实现了制动。其接线原理图如图2-43a所示。其机械特性及工作点的变化如图2-43b所示。当电动机的转速接近零时，必须立即切断电源。否则电动机会反向起动运行。

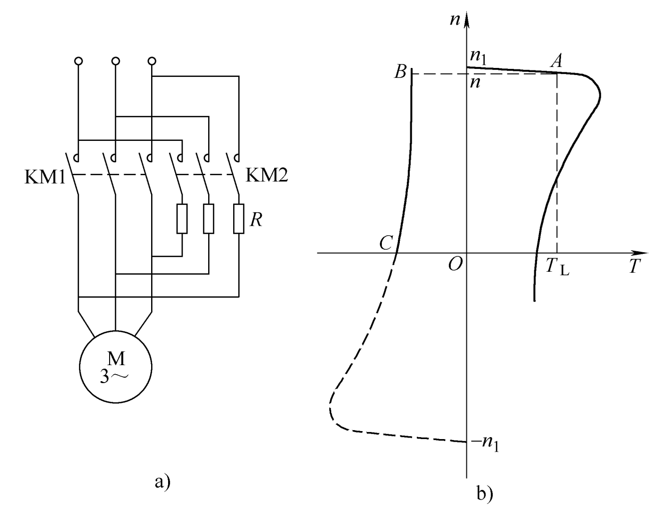


图2-43　笼型电动机的正转反接制动
a）接线原理图　b）机械特性

采用此种方法制动，由于转子中的感应电动势比起动时大得多，所产生的制动电流及制动转矩是相当大的。为了限制制动电流以及减少制动情况下的机械冲击，在制动过程中，可在笼型电动机的定子回路串入反接制动电阻 R（见图2-43a）；而绕线转子电动机则在转子回路中串联一个反接制动电阻。

对额定电压为380V的笼型异步电动机，为了限制其反接制动电流不超过起动电流，定子每相绕组中串入的电阻值，可按下式估算：

$$R = 1.5\frac{U_1}{I_{st}}$$

式中　R——每相串接的电阻值（Ω）；

U_1——电动机定子绕组的额定相电压（V）；

I_{st}——电动机的起动电流（A）。

图2-44所示为三相异步电动机单向运行反接制动控制电路，图中，KM1为电动机单向运行接触器，KM2为反接制动接触器，KV为速度继电器，R 为反接制动电阻。

电路工作情况：电动机已处于单向旋转时，KM1通电并自保，电动机单向旋转，并使其速度继电器相应触头闭合，为反接制动作准备。需停车制动时，按下停止按钮SB1，KM1线圈断电释放，其三对

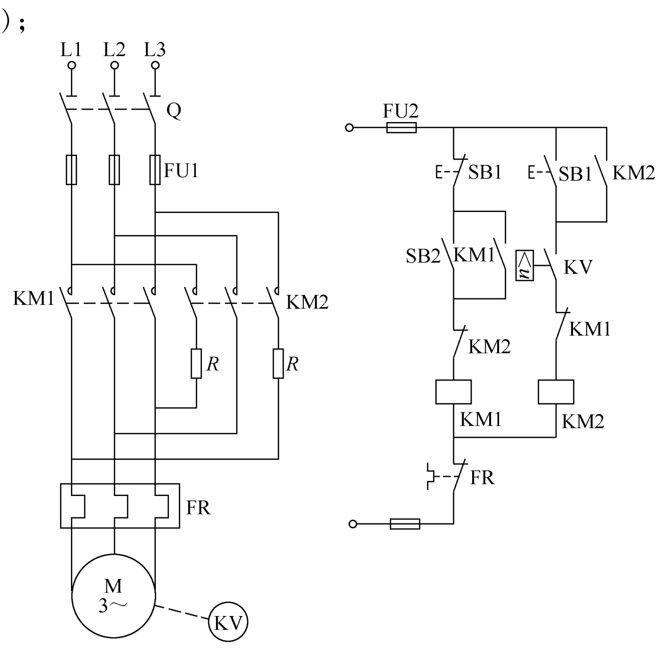


图2-44　三相异步电动机单向运行反接制动电路

主触头断开，切除三相交流电源，电动机以惯性旋转。当将 SB1 按到底时，SB1 常开触头闭合，使 KM2 线圈通电并自保，电动机即串入电阻 R，接入反相序三相电源中。此时，电动机进入反接制动，电动机的转速迅速下降，当电动机的转速下降到低于 100r/min 时，速度继电器复原，其常开触头复位，使 KM2 线圈断电释放，电动机断开反相序电源，自然停止。

2. 倒拉反接制动

倒拉反接制动也称电动机正接反转制动。绕线转子异步电动机在拖动的起重机下放重物时，电动机的定子绕组仍按提升重物正转接线。若转子外串的电阻足够大，其机械特性就会变得很软，如图 2-45 曲线 2 所示。

当电磁转矩小于负载转矩 T_L 时，电动机可能反转，重物下降，电动机此时产生的电磁转矩则成了制动性转矩，而负载转矩 T_L 反而为拖动性转矩。在 $T = T_L$ 时，电动机稳定运行于某一转速（图 2-45 中的 B 点），电动机在运行中起着限制重物下放速度的作用。如果调节转子外串电阻的大小，可控制重物在不同转速下降落。

图 2-45　倒拉反接制动的机械特性及工作点的变化

另外，在转子回路串入频敏变阻器的制动效果会更好些。

反接制动适合于制动要求迅速，且不频繁的场合。

三、能耗制动（动力制动）

正在运行的异步电动机，将其交流电源切除，立即接到一个直流电源上，如图 2-46a 所示，这时在电动机气隙内就产生一个静止不动的磁场。正在旋转的转子和静止磁场相对切割，产生转子电流。此电流与静止磁场相互作用，则产生一个和转子旋转方向相反的制动转矩，从而使电动机迅速停转，如图 2-46b 所示。这种制动作用是消耗转子动能获得的，故称为能耗制动或动力制动。

这种制动方法，一般用在非逆转或停转后才允许反转的可逆传动系统上。

实际生产中，有多种耗能制动控制电路，这里，仅举两种典型控制电路。

1. 按时间原则控制的单向运行能耗制动控制电路

对功率较大的电动机，可采用图 2-47 所示的控制电路。图中，KM1 为单向运行接触器，KM2 为能耗制动接触器。KT 为时间继电器，T 为整流变压器，DB 为桥式整流电路。

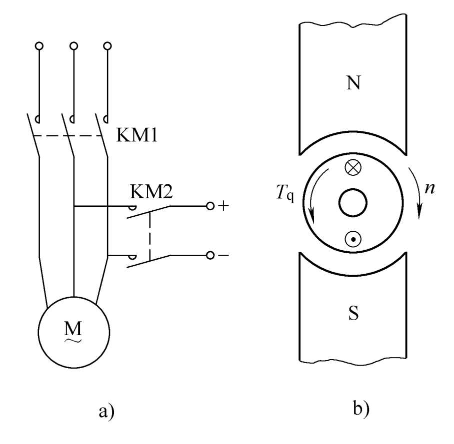


图 2-46　能耗制动

电路工作情况：电动机原已单向运行，KM1 通电并自保。若要使电动机停转，按下停止按钮 SB1，KM1 线圈断电，电动机定子脱离三相交流电源；同时，KM2、KT 线圈同时通电并自保。KM2 主触头将电动机两相定子绕组接入直流电源（直流电源是由交流降压并整流获得），进行能耗制动，使电动机转速迅速下降。当转速接近零时，时间继电器 KT 延时时间到，其常闭延时断开触头动作，使 KM2、KT 线圈相继断电，制动过程结束。

该电路中，将 KT 常开瞬动触头与 KM2 自保触头串接，是考虑到一旦时间继电器线圈断线或发生其他故障，影响 KT 常闭延时断开触头打不开而致使 KM2 线圈长期通电，造成电动机定子长期通入直流电源。引入 KT 常开瞬动触头后，则避免了上述故障的发生。

对功率较小（10kW 以下）的三相异步电动机，且制动要求不高的场合，为减少设备，降低成本，还可采用无变压器的单管能耗制动控制电路。图 2-48 所示为该种控制电路图。

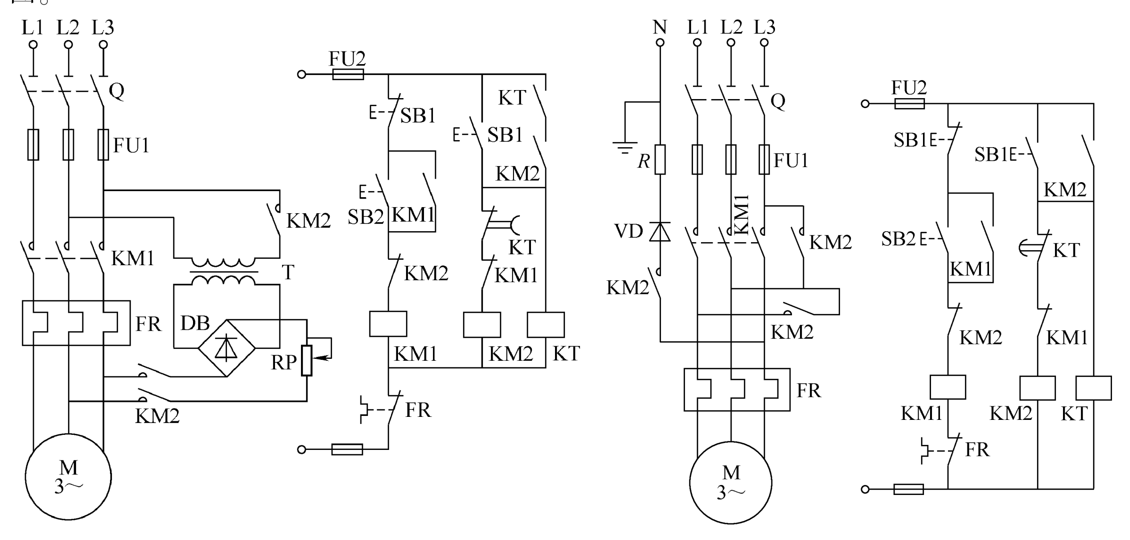


图 2-47　时间原则控制电动机能耗制动电路

图 2-48　无变压器的单管能耗制动控制电路

图中，KM1 为线路接触器，KM2 为单管能耗制动接触器，KT 为能耗制动时间继电器。该电路整流电源为单相 220V 电压，由 KM2 主触头接至电动机定子绕组，经整流二极管 VD 接至中性线（零线）N 构成回路。制动时，电动机的 U、V 相被 KM2 的触头短接，则只有单方向制动转矩。电路工作情况和图 2-47 电路相似，读者可自行分析。

2. 按速度原则制动的可逆运行能耗制动电路

图 2-49 所示为速度原则控制的可逆运行能耗制动电路。图中 KM1、KM2 为电动机正反转接触器，KM3 为能耗制动接触器，KV 为速度继电器。

电路工作情况：合上电源开关 Q，根据工作需要按下正转或反转起动按钮 SB2 或 SB3，相应接触器 KM1 或 KM2 通电吸合并自保，电动机正常运行。此时速度继电器的正转或反转触头 KV-1 或 KV-2 闭合，为接通 KM3 实现能耗制动作准备。

制动时，按下停止按钮 SB1，电动机定子绕组脱离三相交流电源。当 SB1 按到底时，KM3 线圈通电并自保，电动机定子接入直流电源进入能耗制动，电动机的转速迅速下降，当转速降至 100r/min 时，速度继电器 KV-1 或 KV-2 触头断开，使 KM3 断电释放，能耗制动结束，以后电动机自然停车。

四、电容制动（自激发电制动）

再生发电制动、反接制动和能耗制动都要由外界供给一定的能量才行。自激发电制动，是利用异步电动机的转子剩磁和转子旋转动能，实现制动的一种方法。它无需要外界供给任何制动能量。同时，制动线路简单，特别适用于惯量较小或有些机械阻尼的场合。

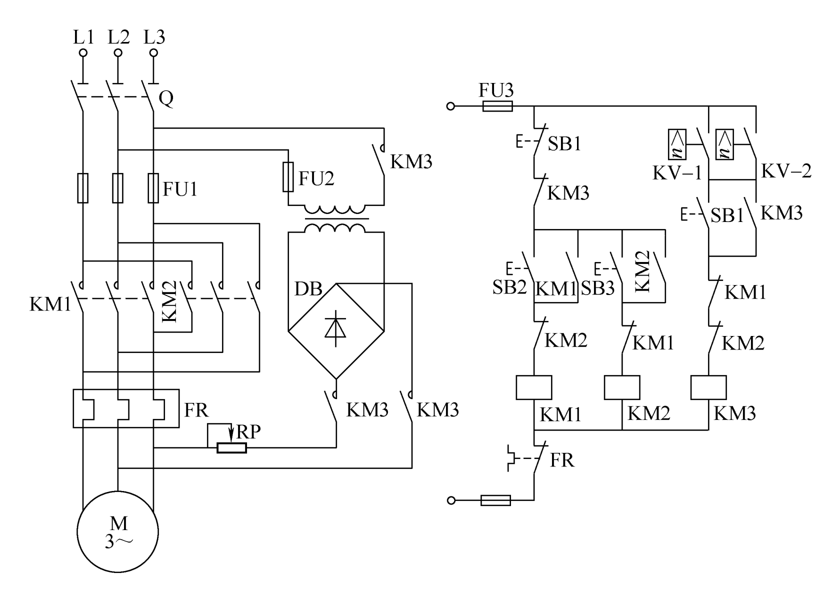


图 2-49　速度原则控制的可逆运行能耗制动电路

图 2-50 所示为电动机电容制动电路。图中 KM1 为线路接触器，KM2 为制动接触器，KT 为制动时间继电器，*C* 为制动电容，*R* 为放电电阻。

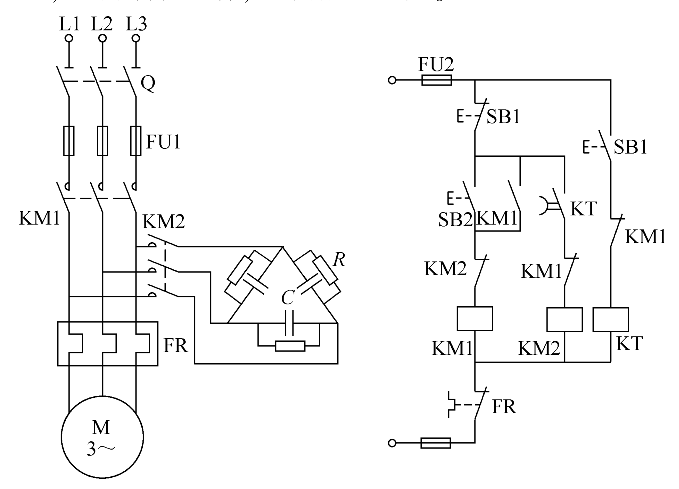


图 2-50　电动机电容制动电路

电路工作情况：三相异步电动机起动时按下起动按钮 SB2，KM1 通电并自保，电动机直接起动。需停止时，按下停止按钮 SB1，KM1 断电，电动机切除交流电源，当按钮 SB1 按到底时，KT 线圈通电，其常开触头立即闭合，为 KM2 线圈通电作准备。当松开停止按钮 SB1 后，KT 线圈断电，但 KT 断电延时断开触头仍处于闭合状态，所以 KM2 线圈通电，KM2 主触头将电阻、电容电路接入电动机定子电路。这时电动机转子以惯性旋转，而转子中存有剩磁，这一旋转的转子磁场切割电动机定子绕组，在定子绕组中产生感应电动势，在定子电阻电容电路中流过电容电流。这一电容电流流过定子绕组建立磁场，使转子的剩余磁场得到加强，产生了感应电动机的自励磁。由于电路并没有注入能量，所以随转子旋转，其

动能转化为电能向定子输入并在 *RC* 中消耗掉，使电动机很快停止。当 KT 延时时间已到，KT 延时断开触头断开，KM2 断电释放，电阻电容器电路从定子电路中切除，电动机电容制动结束。图中 KT 延时时间即为电动机电容制动时间。

因为电容制动是一种新型，实用可靠，节约电能的制动方法，目前已逐渐被广泛用于一般的机械制动。

五、双流制动

双流制动主电路如图 2-51 所示。图中 KM1 为正常运转接触器，KM2 为制动接触器，其使电动机按反相序接入电源，并串入整流二极管。

当电动机运行转入制动时，KM1 断电释放，KM2 通电吸合，由于整流二极管的作用，其中交流成分产生反接制动转矩，而直流成分产生能耗制动转矩，故称为双流制动，也称为混合制动。由此可知，双流制动既避免了能耗制动的制动力矩不足，又避免了反接制动难以准确停车的缺陷。

双流制动使电动机迅速制动，并进入反相低速运行，其低速约为电动机同步转速的 1% ~2%，可在适当时间切除 KM2，实现电动机拖动运行部件的准确定位。

图 2-51　双流制动主电路图

六、机械制动

当电动机切除电源后，用安装在电动机轴上的专用机械制动器，迫使电动机停车，这种方法称为机械制动。

制动器一般由专门的电磁铁来操纵，这种电磁铁称为制动电磁铁。制动电磁铁与制动器的组合，俗称电磁抱闸。

现以弹簧式长行程电磁铁双闸瓦制动器为例作一介绍。这种制动器结构简单，能与电动机控制线路联锁。制动器的电磁线圈与发动机定子绕组并联，当电动机停止工作或停电事故发生时，电磁铁自动停电，制动器便自动抱紧闸轮，使电动机停转。

图 2-52 所示为制动器结构原理图。它主要靠弹簧的张力使闸瓦抱紧闸轮。图中拉杆两端分别联接于制动臂和三角板上，制动臂和套板联接，套板的外侧装有主弹簧。电磁铁通电时，抬起水平杠杆，带动立杆向上运动，使三角板绕轴顺时针方向转动，主弹簧被压缩。在拉杆与三角板的作用下，两个制动臂分别左右运动，使闸瓦松开闸轮。当需要停止时，电动机断电，电磁铁也同时断电。在主弹簧的张力作用下，使闸瓦恢复原位抱着闸轮。制动力矩的大小主要靠调整主弹簧的张力得到。图 2-53 所示为电磁抱闸机械制动控制原理图。

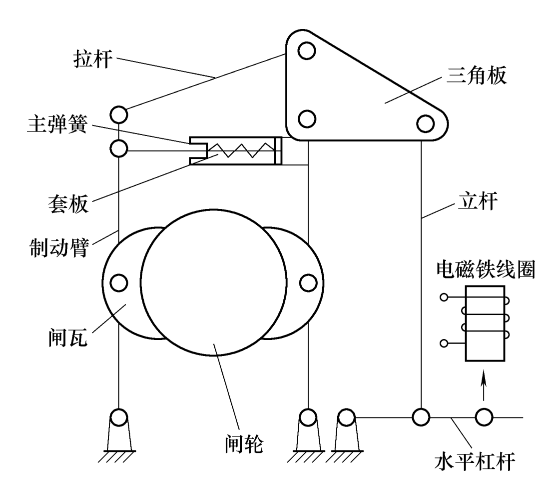


图 2-52　长行程制动器原理图

电路工作情况：合上电源开关 Q，接通控制电路电源。起动电动机时，按下起动按

钮 SB2，接触器 KM1 线圈通电，其常开主触头闭合，使电磁铁线圈 YB 通电，制动闸松开制动轮。与此同时，接触器 KM2 线圈通电并自保，电动机起动运行。停车时，按下停止按钮 SB1，接触器 KM1、KM2 线圈同时断电释放，接着 YB 线圈断电，电动机脱离三相交流电源，同时电磁抱闸在弹簧作用下，制动闸可将制动轮紧紧抱住，电动机迅速停转。

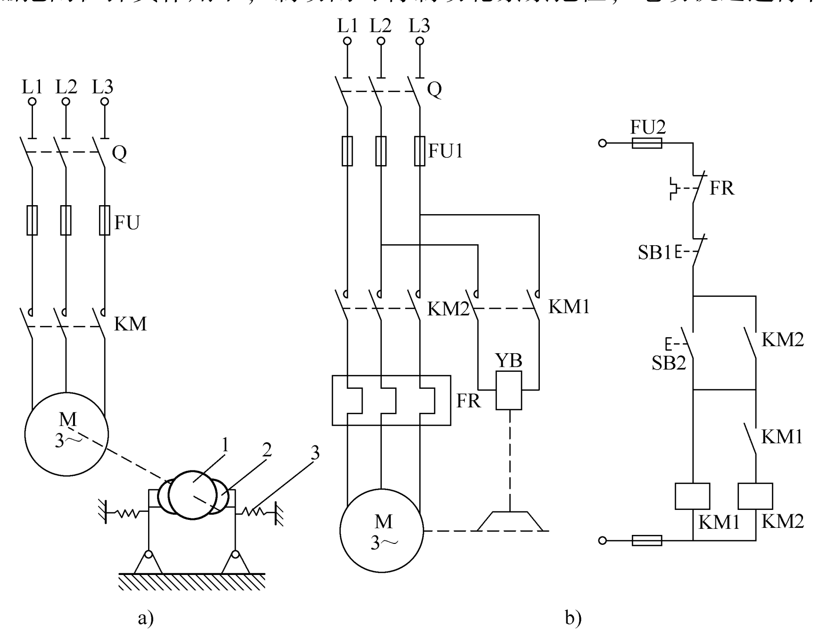


图 2-53　电磁抱闸机械制动控制原理图

a）制动原理　b）断电制动控制电路

1—制动轮　2—制动闸　3—弹簧

机械制动器还有短行程的，结构原理与上面的相似。另外还有靠液压制动的液压制动器。它们的共同特点是：工作不自振、制动力矩稳定、闭合动作较快。在提升机构及卷扬机械上应用比较广泛。

第九节　专用自制动三相异步电动机

专用自制动三相异步电动机是一种自身带制动结构的电动机，其制动方式也属于机械制动范畴。此类电动机专作单梁吊车及行走机构的动力，及其他要求快速，准确停车的机械。如橡胶化工机械、木工机械以及机床的进给系统等。

常用的自制动异步电动机有傍磁式、杠杆式和锥形转子三种结构型式。下面分别介绍它们各自的结构特点和制动原理。

一、傍磁式自制动异步电动机（YEP 系列）

傍磁式自制动异步电动机有多种结构型式，其制动原理基本相同。图 2-54 所示为其一种常见结构。

电动机的制动机构装在电动机的非轴伸端。电动机的风扇外圈上装有一个非金属制动环，随电动机一起旋转。电动机端部的罩壳内侧装有可调锥形制动圈，在电动机内固定不

动。它和制动环互相摩擦接触产生制动力矩。其摩擦面上的压力由电动机轴上的弹簧产生。制动转矩的大小由罩壳上的调整螺丝调整。电动机的定子铁心比转子铁心稍长。在对应的长出部分的转子轴上装有分磁铁。定子通电后产生旋转磁场。它在分磁铁上产生一个轴向电磁吸力，将衔铁吸合。制动机构与衔铁是制成一体的。衔铁被吸合的同时，使制动环与制动圈脱离摩擦，并压缩弹簧。电动机开始转动运行。当定子切断电源后，分磁铁吸力消失。制动机构在弹簧压力下使制动环复位，与制动圈接触摩擦，将转子制动迅速停车。调整外面的调整螺丝即可改变制动时间的快慢。

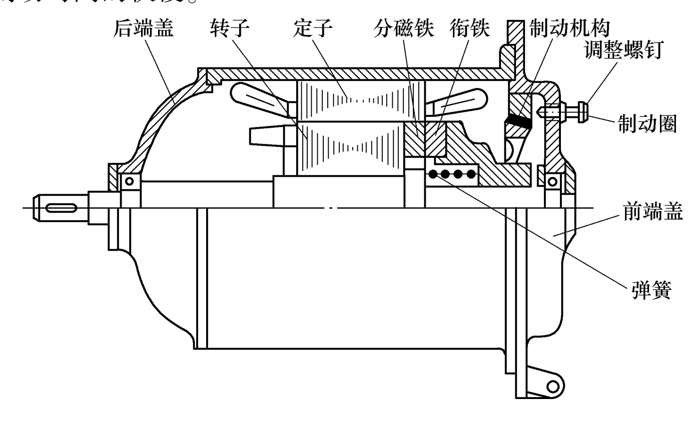


图 2-54　傍磁式电动机

二、杠杆式自制动异步电动机（YEG 系列）

杠杆式自制动异步电动机的制动机构见图2-55。其制动装置装在电动机非轴伸端的端盖上。固定在轴上的制动轮由抱闸夹住，其夹紧力由弹簧产生。电动机的定子铁心比转子铁心稍长。在定子铁心长出部分的内圆上，装有若干个半圆弧形的衔铁。

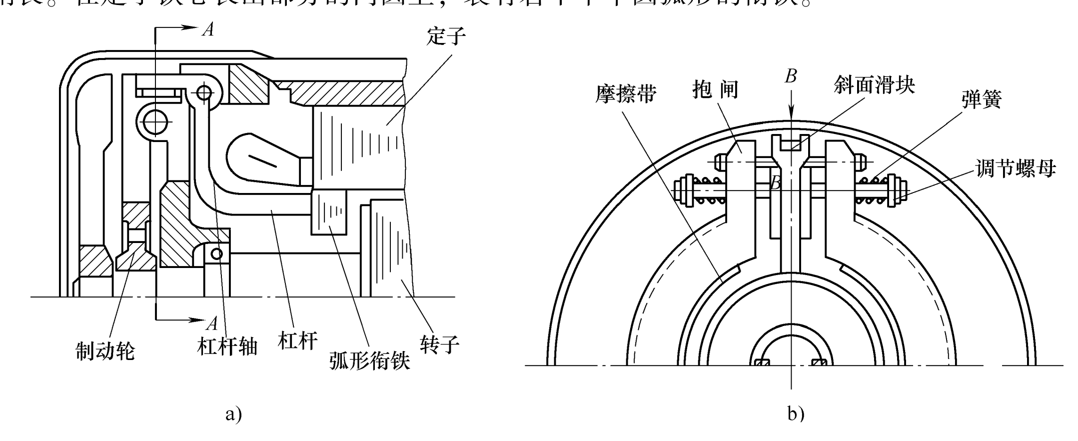


图 2-55　杠杆式制动机构

定子通电后，将半圆弧形衔铁吸向定子铁心，通过杠杆推动斜面滑块，使抱闸撑开，电动机旋转。当定子电源断开后，弧形衔铁吸力消失，斜面滑块受弹簧力的压力而滑出，抱闸夹住制动轮，电动机被制动迅速停转。

调节弹簧的压力即可调整制动力矩，在小范围内改变制动时间。抱闸的摩擦带磨损，可

用调节螺栓调整。

三、锥形转子异步电动机（YEZ 系列）

锥形转子异步电动机，其定子内腔和转子外形都呈锥形，如图 2-56 所示。

定子通电后，电动机除产生使转子旋转的转矩外，同时还产生一个轴向磁拉力。该拉力使转子轴向移动并压缩制动弹簧，让风扇制动轮上的锥形制动环与制动体（后端盖）离开，转子随即运行。定子电源断开后，电动机的轴向磁拉力消失。转子在弹簧压力下，连同风扇制动轮一起复位，使制动环与制动体接触产生摩擦力矩。迫使电动机迅速停转。

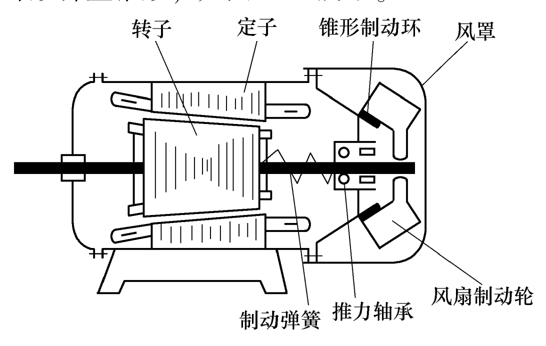


图 2-56　锥形转子电动机结构示意图

锥形转子电动机多用于电动葫芦或单梁起重机的行走机构上。用于电动葫芦时，制动轮摩擦面呈锥形，以增大制动力矩。若用于行走机构时，摩擦面为一水平面，使其制动平稳。

第十节　特种结构的三相异步电动机

为适应在特殊环境条件下工作，或特定机械的需要，生产中制造了各种特殊结构的异步电动机。这里介绍常见的几种。

一、防爆电动机

在煤矿、石油、天然气和化学工业中，都有可燃性气体、煤尘、瓦斯等，与空气混合容易爆炸，有造成火灾的危险。在这种场合下运行的电动机，一旦出现故障，是引起爆炸和火灾的根源。因此，要求电动机的结构必须是防爆型的，以保证安全。

防爆型电动机的运行性能与普通异步电动机相同，只是有特殊的防爆能力。根据防爆措施的不同，它分很多种。常用的有防爆安全型、隔爆型和防爆通风、充气型三种。

1. 防爆安全型电动机（YA 系列）

YA 系列电动机在正常情况下工作时，不产生火花，也不产生危险的过热部位，从而使它在运行中不会导致爆炸危险。所以称为安全型电动机。此种电动机在结构上采取的具体措施是：电动机的外壳提高了对外来固体异物和水滴等的防护等级；导体连接可靠，不会在电动机运行中因受振动、过载等因素而松动、开焊或断线；接线盒与盒座之间加橡胶垫圈密封；绕组的绝缘介电强度高于普通电动机的规定值；电动机绕组的允许温升比普通电动机的规定值要低等。

同时，在使用此种电动机的线路上还要加设电动机的过载、短路等故障的保护措施。

此类电动机仅适合于在不正常情况下才能形成爆炸性混合物的场合下工作。它的功率等级在 0. 6 ~ 100kW。

2. 隔爆型电动机（YB 系列）

YB 系列电动机在外壳内部发生爆炸时，不会引起外部爆炸性混合物也爆炸，故称隔爆型。此类电动机的结构特点是：它的防爆外壳有较高的机械强度，能承受一定的爆炸压力；

外壳各部件的连接处有足够狭长的间隙，使外壳外逸的火焰与爆炸后的物质冷却到安全的温度，不致引起外部易燃物爆炸；隔爆接合面的紧固零件防松装置，防止接合面在内部爆炸压力下变形或失去隔爆作用；接线盒密封严密可靠，以便防止飞弧和闪络。

这类电动机适用于石油、化工、煤矿井下等有爆炸性混合物的场所。因为此类电动机防爆较可靠，故应用较广泛。

3. 防爆通风、充气型电动机（YF 系列）

YF 系列电动机是在电动机外壳内通入一定压力的新鲜空气或惰性气体，以阻止外部爆炸性混合物进入电动机外壳内部。故称通风、充气型。它在工作时，包括电动机本身在内的整个系统中，连续通以不含有爆炸性混合物的新鲜空气或充以惰性（非燃性）气体，使整个系统内部保持一定的压力，这样就阻止了爆炸性混合物从外部进入电动机。

此类电动机的主要结构特点是：电动机内没有通风死角，同时为了使得通入电动机的气体保持一定压力，采取了一定的结构措施。

对上述各类防爆电动机进行选择时，要特别注意核对电动机的防爆类型、防爆级别和组别是否符合使用场所的需要。

安装和使用防爆电动机时，它的进线装置不仅要可靠密封，电动机本体及接线盒要可靠接地，而且一定要对其控制回路的保护措施和通风系统进行严格检查，并且严格按操作规程操作。

在维修防爆电动机时，要特别注意外壳各部件的隔爆接合面上不得有损伤和锈蚀，隔爆接合面上不准涂油漆，只允许涂薄层防锈油脂。

二、潜水（潜油）异步电动机

1. 潜水异步电动机（YQS 系列）

潜水异步电动机是一种立式专用三相笼型电动机，它与潜水泵组成一体，潜入水下工作。主要用于排水或农用灌溉等。

因为此类电动机在水中长期运行，因此它的结构要有严密的密封措施，使水与电动机的电气部分彻底隔绝。

此类电动机常见的结构型式有四种：干式、半干式、充水式和充油式。

干式潜水电动机的结构特点：除外壳以及接合面有密封外，它的轴伸端还装有机械密封装置，防止水和沙粒进入电动机内腔，内腔保持无水干燥。如图 2-57 所示。

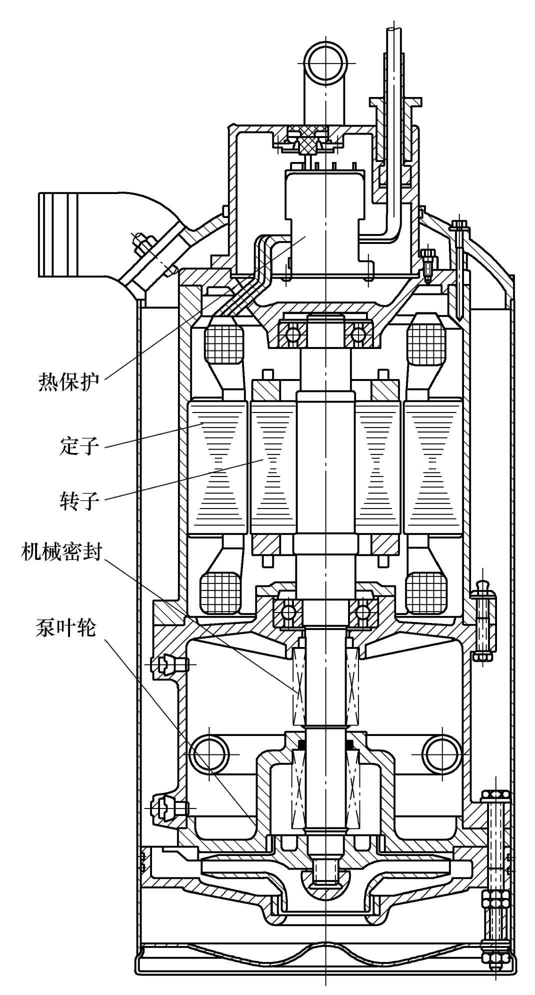


图 2-57　干式潜水电动机结构

半干式潜水电动机，仅定子绕组用非磁性的屏蔽套密封起来，防止水进入绕组。

充水式潜水电动机的内腔充满清水，和潜水泵配套。但各止口接合面以“○”形圈密封，轴伸端也装有单端面或油封式的密封装置，主要防止外界泥沙进入机内。定子绕组长期浸在清水中，通常用聚乙烯尼龙护套耐水线绕制。另外，电动机的各部件都采取了防锈。防腐蚀等措施。电动机引出线的接点均用自粘胶带包扎后密封，保持绝缘良好。

充油式潜水电动机与充水式电动机的主要不同是：电动机内腔充的是变压器油，而且内部油压稍大于外部水压。因为变压器油的绝缘性能好，且有润滑性，所以比充水电动机性能要好。由于充水式和充油式潜水电动机的性能较为优越耐用，生产实际中对其应用更为广泛。

在使用潜水电动机之前，必须要检查各部件的装配是否良好紧固，充水式电动机一定要充满清水；充油式电动机必须充满油。并且要检查其绝缘电阻，一般不应低于5MΩ。

由于潜水电动机装有密封装置，所以对它们的起动、停车不宜过于频繁。电动机停车后，最好过5min后进行第二次起动，以免电动机的温升过高。

潜水电动机在水内工作，它的运转情况不能直接观察。因此，在它运动过程中，要注意其电压、电流是否正常。同时还要注意水泵出水量的情况。发现出水量减少或中断，应及时切断电源，查找原因。

此外，电动机要经常检修，特别对它的密封装置和易损件更要检查，如有损坏，应及时更换。

2. 井下用潜油异步电动机（YQY 系列）

井下用潜油异步电动机一般为立式的三相两极笼型电动机。它与多级离心泵组合在一起，通称潜水电泵。

它潜入几百米以至几千米的油井中工作，连续可靠地抽取井下原油和井液。它具有排油量大、效率高等特点。所以，用于强力抽取高产井、水淹井中的液体，或用于深井、斜井的采油。

上述的工作特点和环境，决定了它的结构。其结构特点是机身非常细长，且密封充油。它的定、转子分若干段，各自有独立的绕组和笼型转子。转子的一根长轴组合在一起。因为考虑到井下液体温度高、压力大，还含有腐蚀性物质，所以定子绕组绝缘有良好的耐油性、耐热性及较高的绝缘性。

在使用这类电动机时，为保证它在深井中可靠运行，对它的控制和保护一般由地面控制和井下信号机构所组成。这种控制的作用是对电动机-电缆系统的对地绝缘电阻进行检测，并能在绝缘电阻过低时切断电源，防止故障的扩大。此外，装置中还配有对电动机的温度保护、欠载瞬时保护、过载延时保护和单相运行保护等，从而减少系统的事故，延长电动机的寿命。

三、屏蔽异步电动机（YP 系列）

屏蔽异步电动机和泵通常组合成机泵合一的密封整体，安装在输送管道中。它主要在原子能、化工、石油、轻工部门来输送不含有颗粒的带有某种危险性的液体（如剧毒、放射性、腐蚀性液体）或昂贵液体。电动机的工作特点是在一定范围的压力和温度下运行，具有高度的密封性，保证被输送的液体不外泄。

由于被输送的液体只在机泵内通过，所以机泵的外部均有可靠的密封装置，与外界彻底隔绝。此外，电动机的结构主要特点是：被输送液体的一部分要进入电动机内作为冷却和润

滑用，为防止液体侵蚀电动机的定转子铁心和绕组，定子铁心内圆及转子外圆分别装有一个屏蔽套。此屏蔽套是用强度很高，耐腐蚀性很强的非碱性不锈钢制成的。将定转子铁心及绕组分别屏蔽。屏蔽电动机的名称就由此而得。此外，电动机还采用了耐腐蚀性、耐磨性良好的石墨滑动轴承。

屏蔽电动机根据输送的液体温度和压力不同，又分常温型、高温型和高温高压型三种不同的结构型式。高温型屏蔽电动机的特点是加装冷却装置，电动机与泵的结合处设有热屏蔽装置。高温高压型电动机是在高温型电动机的基础上适当加强了结构的机械强度。高温型屏蔽电动机结构如图 2-58 所示。

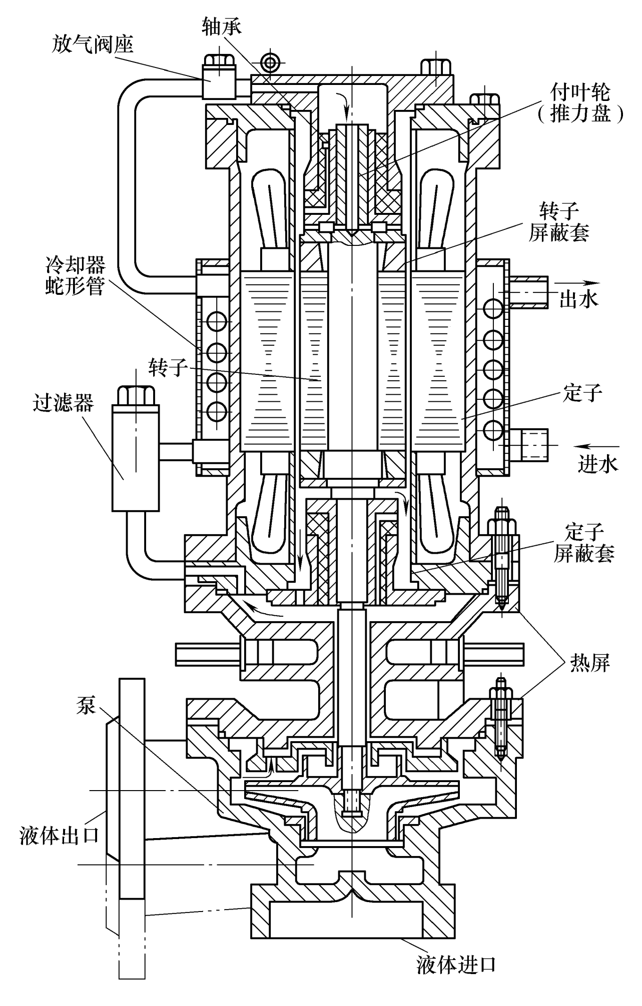


图 2-58　高温型屏蔽电动机结构

在使用屏蔽电动机时，要特别注意：电动机的内腔一定要充满被输送的液体后再运行，运行中冷却液不能中断；对石墨轴承要经常检查，一旦磨损，必须更换；电动机的屏蔽套需要更换时，要将旧套的两端焊缝车削掉再抽出，换上新套一定要焊牢。

四、直线异步电动机

生产实际中，许多机械需要直线运动。直线异步电动机就是为适应机械直线运动的要

求，从旋转电动机演变而成的一种特殊结构电动机。它将电能直接转换为直线运动的机械能。

这里简要介绍这种电动机的工作原理和结构特点，供读者参考。

直线异步电动机的原理结构如图 2-59 所示，设想用一轴向平面，沿半径方向把笼型电动机的定、转子剖开，并加以展开拉直，便成为一台可作直线运动的异步电动机。

由于定子磁极和直线运动的部件呈扁平状，所以称为扁平型直线电动机。为区别于旋转电动机，通常把直线电动机中作直线运动的部件成为滑子。

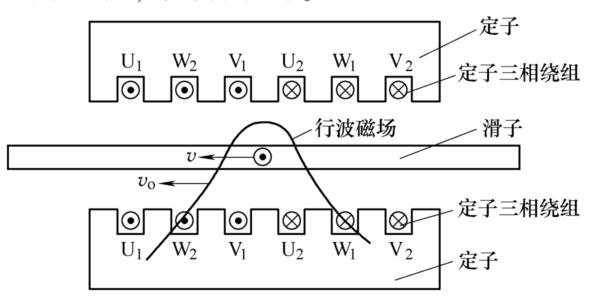


图 2-59　直线异步电动机的原理结构

当直线异步电动机的定子绕组通以三相交流电流后，便建立一个按 A、B、C 相序沿直线移动的行波磁场。其直线运动的速度为

$$v_0 = \frac{D_a}{2} \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{60f_1}{p} = 2bf_1 \quad (\mathrm{m/s})$$

式中　b——每个磁极的直线宽度（m）。

行波磁场切割滑子上的导体，将在其感应电动势及电流，它与气隙中行波磁场互相作用，产生电磁力，驱使滑子随行波磁场的移动而运动。设滑子的线速度为 v，则转差率 s 为

$$s = (v_0 - v)/v_0$$

此外，行波磁场对滑子还产生一个纵向磁拉力。为消除此拉力，实际电动机中在滑子的两侧各装一个定子。这样，两侧对滑子的磁拉力相互抵消。这种结构称为双边型。滑子作直线运动后，定、滑子之间的互相作用要保持不变。为此，在直线电动机的结构中，定子和滑子二者之一必须延长。通常，都做成短定子、长滑子的结构型式。该电动机的构成简单，制造成本低。

与旋转异步电动机比较，直线电动机在电磁原理方面有以下特点：

1）直线电动机的定子绕组展开，三相绕组在空间的位置不是对称的，边缘和中间的线圈耦合不同，三相绕组的漏电抗也不等，因而三相电流是不对称的。

2）旋转电动机的定子铁心和绕组沿周围是连续的。而直线电动机的铁心是断开的，存在始端和终端。这样，它的铁心两端外空间中仍有磁场，称它为边缘磁场。当滑子进入或离开气隙区时，滑子导体会产生一个附加电流，迭加在滑子导体所感应的电流上，直线异步电动机的这种效应称为“边缘效应”。

3）由于机械上的原因，直线异步电动机的气隙比旋转式异步电动机的气隙大得多。因而功率因数较低。

由于直线电动机还存在着上述不足，所以在实践中还在不断地改进。

直线异步电动机目前主要用于起重吊车，传送带，阀门和铁路的自动扳道岔执行器，自动生产线上的机械手以及高速列车上。

第三章　三相异步电动机的运行维护

三相异步电动机通常是比较坚固耐用的。它正常使用的寿命一般在十到二十年左右。若使用的得当，保养及时，其使用年限会更长。但是它在运行中也会遇到非正常因素，致使电动机出现一些故障，若不及时发现和排除，有的故障会迅速扩大，导致电动机本身及有关设备遭到严重损坏。

本章根据长期的生产实践，介绍三相异步电动机在运行中常见的一些故障现象，分析其产生的原因，总结查找和故障处理的一般方法和经验。并介绍三相异步电动机保养和维护方面的知识。此外，还简要介绍对三相异步电动机采用的一些自动保护措施供读者参考。

第一节　三相异步电动机运行中的故障分析

根据生产中大量的实践，三相异步电动机在运行中难免出现故障，影响生产，为此，我们每个操作者必须熟悉电动机在运行中出现的一些故障现象以及产生故障的原因。做到及时发现和排除，延长电动机的寿命，保证生产的正常进行。本节对此进行专门介绍。

一、三相异步电动机主要故障分析

三相异步电动机的故障可以说是多种多样的，产生的原因有时也是多方面的。这里仅举几个常见的典型故障加以分析。

1. 异步电动机的过热现象

电动机在起动和运行过程中，由于本身的各种损耗，均以热能的形式释放出来，所以电动机在运行中必然会发热。尽管电动机在设计制造时采取了一些散热措施，但是电动机在运行中的温度仍然比环境温度要高。电动机运行时，只要不超过允许温升值，都属于正常现象。可是，由于某些原因，使电动机的温升超过了允许值。这种现象就称为电动机的过热。

电动机的过热对它是很不利的。其中，主要对电动机的绝缘材料破坏严重。长期的过热会使绝缘材料迅速老化，性能下降，导致电动机的使用寿命缩短。严重过热，绝缘材料会被烧焦，使电动机即刻损坏。这种故障对电动机的报废率很高。

异步电动机运行中出现过热现象，主要从以下几个方面分析原因。

1）异步电动机本身产生的热量过多。电动机热量的产生是来自本身的各种损耗。所以电动机无论哪一种损耗过大，必然使电动机过热。而电动机损耗中，定、转子的铜损耗大小主要取决于电动机的电流；定、转子的铁损耗主要取决于铁心的质量和磁通的大小；电动机的机械损耗主要与机械运转的摩擦情况有关。因此，凡是导致电动机的电流过大，磁通过大的因素，以及铁心质量下降和机械摩擦严重，都将使电动机过热。其中，电动机的电流过大是电动机过热的主要因素。比如电源电压的过高或过低，电网电压的不对称，电动机的过载运行，机械负载运转不灵活或卡住，电动机定、转子绕组回路发生短路或断路，定子绕组的接线错误等，都会使电动机的电流过大或磁通过大，导致电动机过热。

2）电动机散热不良是电动机过热的另一个重要因素。比如电动机散热部件的损坏，风

罩的脱落或散热片的破损，外装冷却设备的停止运行，电动机内部的灰尘太多，进风口被杂物堵塞等，均能使电动机的散热受到影响，使电动机过热。

3）环境温度过高也是电动机过热不可忽视的一个因素。

要想了解究竟什么原因使电动机过热，首先要查看电动机过热的部位。然后应仔细观察电源电压，电动机的电流及声音等，并比较电动机空载和负载运行，电动机与被带机械连接和不连接时运行情况的区别。通过比较，才能逐步查找出是电源、电动机、负载的问题，还是通风散热不良的问题。

2. 电动机的单相运行和“V”接状态

把电动机接在电源上，往往要经过一些控制电器和保护环节。长期的运行使用，会出现刀闸和控制电器的触头会因烧伤引起接触不良、电流过大引起熔丝熔断而未被发现、刮风下雨造成电网线路的局部断开、工作粗心使线路的接点接触不良等现象，均使电动机的电源进线发生断路。如果进线中的三相或两相同时断开，电动机无电流通过，电动机不工作，也不会损坏。这种情况容易被发现。若进线只一相断路，不仅不易发现，而且对电动机的损坏程度也是严重的。电动机的这种故障通常称为电动机的单相运行故障。

单相运行故障对电动机的影响主要有两方面：

1）无论电动机是采用星形接法还是三角形接法，一相进线断开时，电动机的电源均属单相电压，各相的电流相位基本相同。这样，电动机内的磁场就变为脉振磁场。根据单相交流异步电动机的原理（后面将介绍），此时电动机的起动转矩为零，不能自行起动。而且，电动机内还有不正常的“嗡嗡”声响。这种情况发生后如果不及时切断电源，电动机的电流将很大，短时间内就会使电动机过热以至烧坏。

2）若带负载正在运行的异步电动机，突然发生单相运行故障，电动机此时可能仍会继续运行。但是，它的转速要明显下降，未断开绕组中的电流会增加很多。

例如星形接法的电动机，一相断电后，接线情况如图 3-1a 所示。W 相断开，其他两相（U、V 两相）承担的负载要增加，这会使两相的电流增加。另外，一相断电后，其他两相的相电压将由原来的额定值220V 下降到190V，此时，电动机内的磁场强度也必然下降，而电动机所带的负载转矩不变，电动机还要产生相应的电磁转矩与之平衡。根据 $T \propto \Phi I_2$，转子电流必须增加，定子电流也会相应增加。把以上两方面的影响考虑进去，不断线的定子每相绕组的电流约增加到原来的$\sqrt{3}$倍左右。如果电动机带着额定负载运行，这样大的电流会使绕组很快被烧坏。

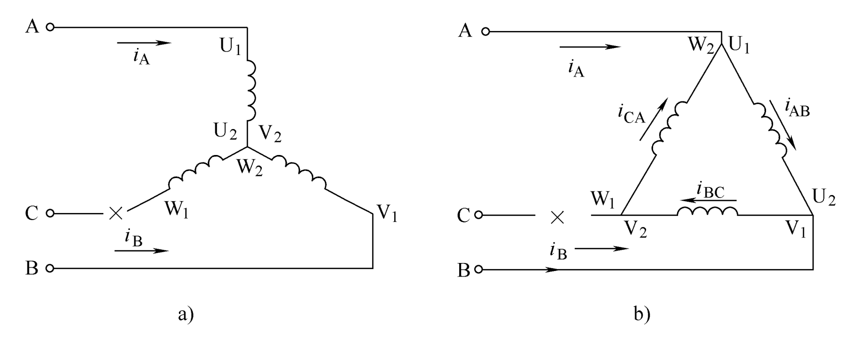


图 3-1　单相运行时的绕组电流

如果电动机绕组是三角形接法，一相断电时，其线路如图 3-1b 所示。实践证明，其中一相绕组（图示的 VW 相）的相电流会增加到原来的近 3 倍左右，另外两相绕组（图示的 UV 和 WU 相）的相电流也会增加到 1.5 倍左右。电动机的线电流也要增加到原来的 2.5 倍左右。这会使电动机很快损坏。

单相运行故障虽然对电动机的损坏率很高，但是这种故障的出现，往往有不正常的声音伴随产生。注意了这个重要特点，会使我们能及时发现并及时进行断电处理。

对于三角形连接的电动机，有时出现绕组内部一相断开，如图 3-2 所示。这种故障不属单相运行故障，通常称之为“V”接状态。

“V”接状态使电动机虽然有起动转矩，但是比原来的三角形接法的情况要小得多。因此，满载时电动机起动要困难。

如果电动机正在运行中出现“V”接状态，那么断相绕组（图中 WU 相）不再作功。其他两相（图中 UV、VW 相）要承担原来的总负载。这样，电动机的两相绕组中的电流会因此而增大很多，电动机会过热甚至烧坏。“V”接状态的故障特点是三相线电流会出现两小一大的不平衡状态，其中一相的线电流是其他两相线电流的$\sqrt{3}$倍。

实际中，“V”接状的出现，对带满负载的电动机来说，其运行是不允许的。

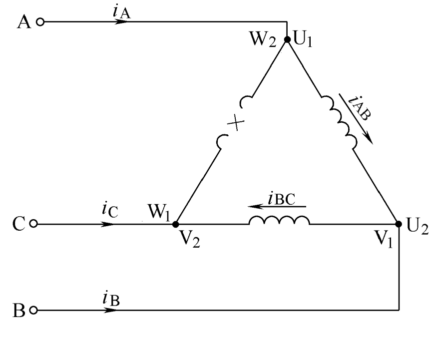


图 3-2　“V”接状态时的电流

3. 定子绕组端线接法错误

前面已经介绍过，异步电动机的定子绕组端线通常有两种接法：星形接法和三角形接法。有的电动机将端头接好后再连通电源，有的电动机则通过控制电器后连接而成。如果不慎将其接错，电动机就会出现故障。

常见的有两种情况：

1）三角形联结的异步电动机误接成星形联结。当接通规定的电源后，将使电动机绕组的相电压降至$1/\sqrt{3}$倍。如果电动机带轻负载（带 40% 以下的额定负载）运行，对电动机不仅无损坏，而且电动机的功率因数和效率还可以提高，这种运行是允许的。但是，大多数电动机往往是带额定负载运行的。这种情况，会因转矩下降到 1/3 而引起起动困难，运行转速低，电流过大，造成电动机很快过热等不良后果。

2）星形接法的电动机错接成三角形。这种错误接线，使电动机的绕组相电压增至$\sqrt{3}$倍。电动机的绝缘因此要承受较高的电压。更重要的是，根据 $U=4.44f_1N_1K_{N1}\Phi$，电压的提高使电动机的每极磁通增至约$\sqrt{3}$倍。这会导致电动机的铁心很快饱和，空载电流将急剧增大，甚至会超过额定电流的几倍，过大的电流和磁通会使电动机很快过热烧坏。这种错误接法是绝对不允许的。

4. 转子绕组故障

笼型转子绕组是铸铝的。一般不容易出问题。但是，有的转子因为铸铝质量不好会使笼型转子断条。转子断条相当于转子部分绕组断路。在负载不变的情况下，电动机转速会下降，引起定、转子电流增大。而且有“嗡嗡”的响声。情况严重的话会造成电动机的起动

困难。

绕线式转子绕组经常处于旋转状态，受离心力的作用。因而它比定子绕组更容易受到损坏。其中主要是绝缘的破损，短路的出现等。其后果和定子绕组损坏类似，它所出现的断路和笼型转子断条后果一样。另外，和转子绕组端线相连的集电环和电刷经常处于摩擦状态。有时因为磨损或压力弹簧的松动使其接触不良，导致转子绕组断路。其后果比笼型转子断条更为严重。

三相异步电动机在运行中常见的故障见表3-1。

表3-1　三相异步电动机常见运行故障

序号	故障现象	故障原因	序号	故障现象	故障原因
1	电动机起动困难或起动后达不到正常转速	1）电源电压过低;电源进线断路或接触不良 2）电动机定子绕组内部或外部一相断路 3）转子断条;绕线式转子绕组断路;滑环和电刷接触不良 4）三角形联结的电动机接错成星形 5）负载转矩过大或有机械卡住 6）定子绕组有短路或接地故障	3	空载电流过大	1）电源电压过高;星接错连成角形 2）电动机的气隙过大 3）定子或转子铁心轴向窜动 4）定、转子铁心质量不好或松动 5）定子绕组匝数小于规定值或局部绕组反接
			4	声音不正常	1）单相运行故障 2）定、转子铁心相擦 3）电动机的气隙不均匀 4）转子断条 5）机械转动零件松动或相擦
2	电动机过热或冒烟	1）过载或机械转动不良 2）电源电压过高、过低或三相不平衡 3）单相运行故障或“V”接状态 4）定子绕组短路或接地 5）环境温度过高或通风不良 6）转子断条或转子断相 7）定子绕组接线错误（丫联结错连成△联结或△联结错连成丫联结;一相始末端接反或局部线圈接反）	5	轴承过热	1）轴承装配不良，或位置不好 2）润滑油过稠、污脏 3）润滑油不足 4）传动带拉的过紧

二、判断异步电动机故障的一般方法

电动机运行中一旦出现故障，应迅速切断电源查清故障原因，以尽快排除。要做到这一点，必须掌握判断故障的方法，这里，介绍一般的判断方法供读者参考。

1）调查了解。要调查电动机的使用历史，如使用时间；是否修复过；基本数据及结构特点等。更要调查电动机发生故障前后的变化及表现的特征，如起动时间和起动电流的情况，起动和运转的声音；是否有异常的焦糊味；电动机发热情况及发热部位等；测量电源的三相电压、电流大小等。调查的情况越清楚越有利于查找故障的原因。

2）根据调查的情况和现象特征，进行分析比较，去伪存真，逐渐缩小原因的范围，得出初步结论。经验越丰富，这一步就进行得越准而且快。

3）借助仪表或拆开电动机，用测得的数据进行证实，如用万用表或兆欧表测量绕组的

电阻及绝缘情况等。如能证实，即可采取措施修复。

综上所述，可归纳为“调查、分析、证实”六字判断法。对较复杂的故障，可反复交叉进行。其中，调查和分析是方法中的关键。现举一例说明。

调查：一台笼型4极异步电动机，30kW，380V，57.6A，△联结法，Y-△开关起动。用了一段时间后，电动机起动正常，但带负载运行1h后，电动机即过热。但不冒烟，无焦糊味。电源电压基本正常平衡，定子绕组电流分别为78A、45A和46A。

分析：这是一台用过的电动机。过去运行正常，说明不会有绕组错接的现象。电源电压又基本正常，造成三相电流不平衡的原因只有绕组断路或短路所致。电动机负载运行1h，既无焦糊味又不冒烟，证实不是短路。再从三个电流数值看，46和45近似相等，而$78\approx45\times1.73$，由此可见，这种情况和电动机“V”接状态后果相似。可是电动机起动正常，证明电动机绕组无断路故障，线路也无问题。电动机运行时的一相断路，问题可能出在Y-△开关的运转档接触不良。

证实：可拆开Y-△开关的运转挡，检查各触头及接线情况，加以验证。若的确有问题，即可采取措施修复。

第二节　三相异步电动机的维护

为了保证异步电动机的正常运行，在运行中不出现或少出现故障，必须对它进行必要的维护。维护的内容主要包括：电动机使用前的检查，运行中的监护和电动机的定期检修。此外，对电动机的运行还要采用一些自动保护措施。

一、异步电动机使用前的检查内容

对新安装或长期停用的异步电动机，在使用前，首先要检查定、转子绕组各相之间和绕组对地的绝缘电阻。一般，绝缘电阻应大于下式所求得的数值：

$$R=\frac{U_N}{1000+\frac{P_N}{100}}$$

式中　R——绝缘电阻值（MΩ）；

U_N——电动机的额定电压（V）；

P_N——电动机的额定功率（kW）。

对绕线转子异步电动机，要检查集电环上的电刷及电刷提升是否处于正常状态。电刷压力要求在0.15～0.25kg/cm^2。

其次，还要检查电动机的机械联接及固定是否可靠、转动部分是否失灵以及轴承是否有足够的润滑油。

安装好的电动机，一定要检查它及其起动设备的接线及接地是否正确和完整，接触处是否牢固。另外，还要查看电源及频率是否正常，它们应和电动机铭牌上所规定的数值相符合。

二、空载运转检查

安装检查完电动机后，还要对电动机进行通电空载运转检查。所谓空载运转，是指电源电压和频率均在额定值的情况下，将电源通入电动机，且电动机不带任何机械负载时的起动

和运行。在这种情况下，一是检查电机的机械质量，包括起动是否平衡和轻快；电机旋转是否均匀，无有害的杂音；定、转子是否相擦；轴承转动是否良好等。二是测量电动机空载电流的大小和三相间是否平衡。

表 3-2 为三相异步电动机的空载电流与其额定电流百分比值的范围。若测得的空载电流超过表中范围过多，则说明该电动机的质量不合格。比如其铁心导磁性能差或定、转子之间的气隙过大或定子绕组的匝数低于规定值等。这样的电动机带负载的能力不强，若仍带着额定负载运行，电动机的电流会超过额定值，使其过热。且它的功率因数也因此而下降。因此，生产实际中，检查电动机空载电流的大小是使用它之前必不可少的重要前提。

表 3-2　三相异步电动机空载电流与额定电流百分比值的范围

磁极数 \ 功率/kW	0.125 以下	0.125～0.5	0.55～2	2.2～10	11～50	55～100
2	75～95	45～70	45～55	30～45	25～35	18～30
4	80～96	65～85	45～60	35～55	25～40	20～30
6	85～98	70～90	50～65	35～65	30～45	22～33
8	90～98	75～90	50～70	37～70	35～50	25～35

此外，通入测量三相空载电流，检查三相空载电流是否平衡。要求任一相空载电流与三相空载电流平均值的偏差不应超过 10%，即应满足下式：

$$\left|\frac{I_{01}-I_{av}}{I_{av}}\right|\times 100\%\leqslant 10\%$$

$$\left|\frac{I_{02}-I_{av}}{I_{av}}\right|\times 100\%\leqslant 10\%$$

$$\left|\frac{I_{03}-I_{av}}{I_{av}}\right|\times 100\%\leqslant 10\%$$

式中　I_{av}——三相空载电流平均值（A），$I_{av}=(I_{01}+I_{02}+I_{03})/3$；

I_{01}、I_{02}、I_{03}——各相的空载电流（A）。

式中的竖线表示计算后取绝对值。

若任一相的空载电流超过平均值的 20%，则说明绕组可能出现匝间短路或轻微接地故障，必须修复。否则，会给电动机运行留有事故隐患。

三、异步电动机运行中的监护内容

1）接通电源后，要观察电动机的起动是否正常。发现电动机不转或起动过慢，应立即拉闸断电，查找原因。

2）对起动后运行的电动机，要看一看三相定子电流是否超过额定值，且不平衡度不能超过 10%。听一听电动机运行的声音是否正常。

3）对运行中的异步电动机，要注意监视电源电压的变化。发现电压过低，要酌情减少电动机的负载或停车查找原因。还应注意三相电源电压的不平衡度不能超过规定值。

4）要时刻注意电动机的转速、声音、振动、气味和温升，如有不正常的情况，应立即采取措施排除故障。

5）电动机工作时，一定要尽力保持环境的干燥和清洁。防止灰尘、水、汽、油等杂物

进入电动机。

四、异步电动机的定期检修

异步电动机的定期检修是保证它长期可靠运行，延长使用寿命的重要措施。

定期检修一般分为小修和大修两种。小修属于一般的检查和维护，对电动机及其他装置不做大的拆卸。大修则要全部拆开清扫、检查和修理。一般，小修次数较多，大修通常每年进行一次。对不能停产的机械可用备用电动机更换检修。检修的项目可见表3-3。

表3-3　异步电动机定期检修项目

项　　目	检 修 内 容
清扫电动机	1）清除和擦拭电动机外壳及定、转子的污垢 2）测量绝缘电阻;受潮的电动机要烘干
检查定、转子的电气接线	1）检查定、转子绕组是否变形,接线是否松脱 2）接线盒中螺丝是否紧固、烧蚀 3）绕线转子电动机的集电环及电刷接触良好程度;对电刷严重磨损的要更换,压力弹簧是否符合要求
检查电动机的机械部分	1）检查各固定螺丝的紧固程度,传动机构情况 2）风扇、制动机构是否完好 3）轴承是否磨损,更换润滑油
清扫和检查电动机的起动和控制设备及线路	1）清除各电器设备的灰尘 2）检查接线有无松动,触头接触是否良好 3）检查接地线是否良好 4）测量绝缘电阻
检查试车	1）检查转动部分灵活程度 2）空载和负载试车是否正常

第三节　三相异步电动机运行中的自动保护措施

异步电动机的安全运行，单靠使用人员的监护还是不够的。随着自动控制系统的使用和发展，对电动机的运行采取了自动保护的措施。而且在自动、准确、迅速等方面正在不断地改进和完善。

这里，仅介绍生产中典型的几种电气保护措施。

一、短路保护

当异步电动机发生短路故障时，及时切除电源，防止过大的短路电流将电动机烧坏。这种保护措施，目前多采用熔断器，将熔断器串联在电动机的进线线路中。当短路电流出现，在极短的时间内将熔丝熔断，达到切除电源的目的。

熔断器一般按其额定电流分若干种。可按下述方法选择熔断器的额定电流值：

1）对单台直接起动的小型异步电动机，选择：

$$熔断器的额定电流 \geqslant (1.5 \sim 2.5) \times 电动机的额定电流$$

当电动机轻载起动时，可取较小值；重载起动时，可选较大值。

2）对几台异步电动机的总熔断器，选择：

熔断器的额定电流≥(1.5～2.5)×最大容量电动机的额定电流＋其余电动机额定电流的总和

3）对减压起动的笼型电动机，选择：

熔断器的额定电流≥1.5×电动机的额定电流

二、过载保护

当异步电动机由于过载等原因使其电流超过额定值时，要用过载保护。常见的过载保护电器是过电流继电器，也称为热继电器。

将热继电器的发热元件的线圈串接在电动机主电路中，它的动作触头串联在控制电路中。当电动机主电路的电流超过发热元件的整定电流时，发热元件即发热变形，从而推动其触点切断控制回路，使电动机的主接触器切断电源，起到保护电动机的目的。

热继电器的整定电流一般调整到等于异步电动机的额定电流值。

三、失、欠电压保护

这种保护是在电源电压过低或断电时，使电动机自动切断电源，防止电动机因低压运行而过热损坏。

失、欠电压保护的措施，常用交流接触器的电磁机构、减压起动器或自动开关的失电压电磁机构来实现。

例如交流接触器。它在正常电压下可以吸住衔铁，使触头闭合接通电路。当电压下降到额定电压的35%～75%时，它的线圈铁心则吸不住衔铁而使触头断开。根据此特点，它的线圈和电动机使用同一电源。这样，当电源电压只要低于规定值后，它立即切断电动机的电源，达到保护电动机的目的。

四、接零保护

当异步电动机在运行中出现定子绕组接地故障时，在220/380V的供电系统中常采用接零保护。

接零保护就是将电动机的外壳和电源的中性线（零线）相接。当电动机一相定子绕组碰壳（即接地），该相的相线（火线）和中性线形成单相短路，从而使熔断器熔断或自动开关跳闸，电动机断电。

五、漏电保护

当电动机发生接地漏电故障时，它的外壳带电，通常出现两种异常现象：电动机三相电流的平衡遭到破坏，出现零序电流；某些不带电的金属部分（如外壳、轴等）出现对地电压。安装漏电保护装置，通过检测机构取得上述异常两种信号，再通过一些机构断开电源，从而达到设备停电保护作用，也达到人身触电安全的目的。

三相异步电动机控制电路中，目前采用的大多是三相三极式漏电流型保护装置。图3-3所示为接在三相异步电动机控制电路中的漏电保护装置的示意图。图中，接在电动机的三相电源线一同穿过漏电保护装置的互感器铁心。正常时，三相电流平衡，瞬时电流和为零，铁心内无交变磁通。电子开关没有输入漏电信号而不导通。电磁开关线圈无电流而不跳闸，电路正常工作。当电动机发生接地故障时，线路就对地产生漏电电流，流过该相的电流大于其他相电流，三相电流不平衡，互感器铁心中产生交变磁通，二次线圈产生漏电信号，并输至电子开关输入端，促使电子开关导通，于是电磁开关得电，产生吸力拉闸，切断三相电源，完成漏电保护。

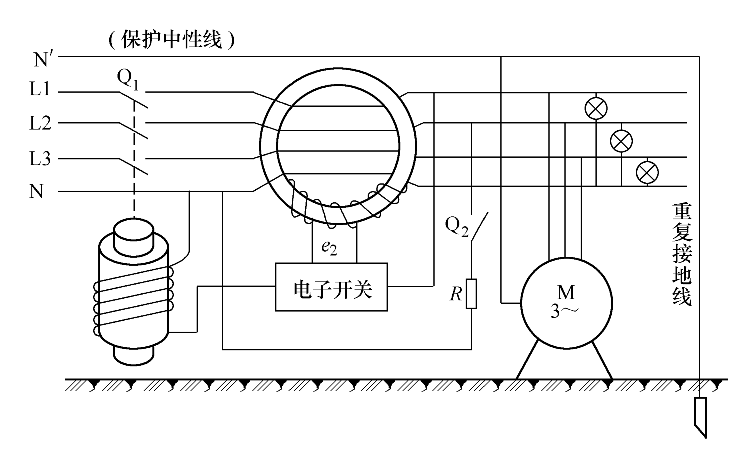


图 3-3　漏电保护装置原理示意图

漏电保护装置还有电压型。有的漏电保护装置同时还具备短路、过电压、欠电压漏电和人身触电等多种保护功能，所以目前越来越被广泛使用。

六、单相运行保护

单相运行保护属于过载保护范围。但是，现行的过载保护措施不能完全使电动机免于单相运行故障。据统计，因单相运行故障而烧坏的电动机绕组占修理的 50% 左右。所以，对单相运行保护有单独提出的必要。

异步电动机单相运行保护的措施有多种方法，仅举常见的几种。

1. 谐波电流断相保护

如图 3-4 所示，采用三个饱和电流互感器 TA，一次侧分别接在电动机的三相输入线路中，二次绕组的首、末端顺次串接。由于互感器工作在饱和状态，铁心中的磁通主要包含基波和三次谐波，因此在互感器的副绕组中感应的电动势，也以基波和三次谐波为主。

电动机正常运行时，串联的三个互感器二次侧的输出电压中，基波电动势为零，只有三次谐波电动势存在。这样，输出的信号电流经整流后，直接作用于高灵敏继电器 KA，保证电动机正常工作。若出现单相运行故障时，互感器初级绕组中流过大小相等、相位差为 180°的两个电流，故副边中不存在基波和三次谐波电动势，信号电流为零。使继电器 KA 释放，接触器 KM 断电，电动机停止运行。

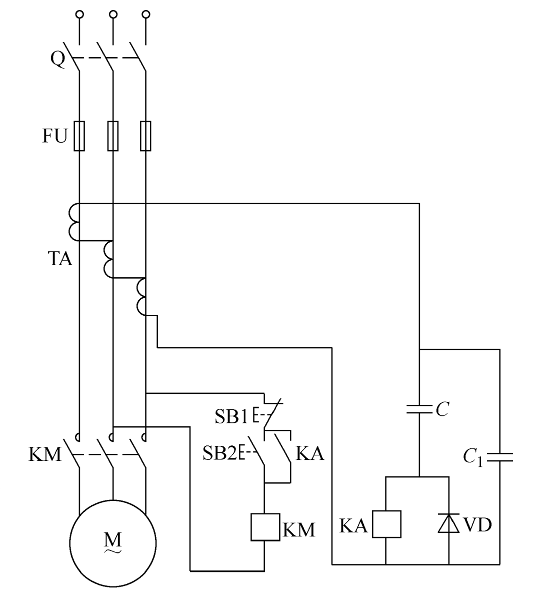


图 3-4　谐波电流断相保护电路

2. 断丝电压保护

当熔断器断丝发生单相运行故障时，可采用断丝电压保护。将三个线圈绕在一个公共铁心上，做成保护线路，如图 3-5 所示。

只要一相熔丝断开，保护继电器 KA 的常闭触头断开，使继电器 KM 线圈断电，从而使电动机断电。该线路简单，但只能实现熔丝断

丝保护，不能保护其他原因造成的单相运行故障。

3. 热敏电阻保护

这种保护方法，是根据电动机发生单相运行故障前后，定子绕组发生温度变化的原理而设计的。在每相绕组的端部或槽内分别放置一个半导体开关型热敏电阻（简称 PTC），其继电效应明显。热敏电阻保护电路，如图 3-6 所示。

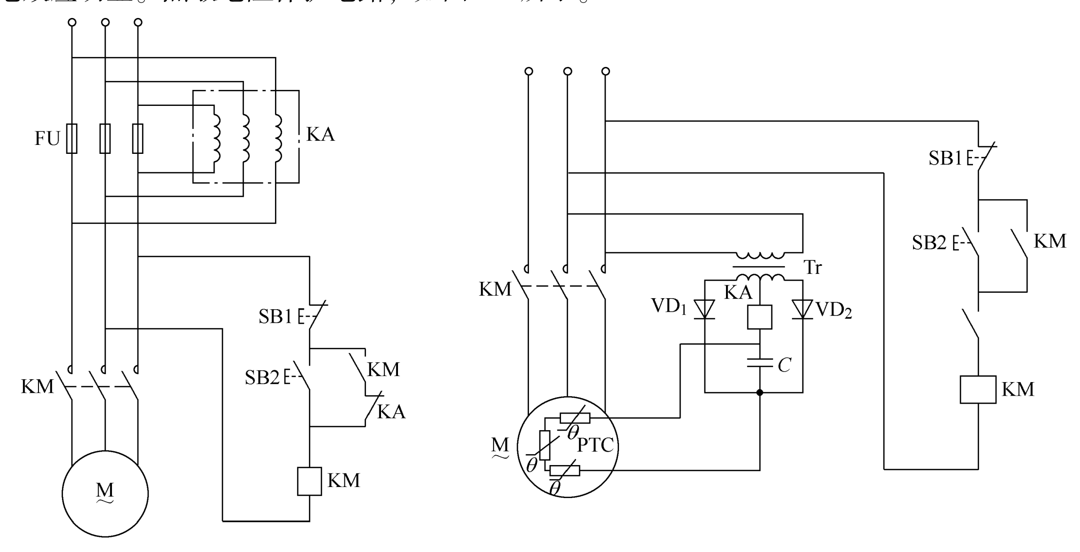


图 3-5　断丝电压保护线路　　　　图 3-6　热敏电阻保护电路

三个热敏电阻串联后，接在小型电磁继电器 KA 线路中。电动机正常运行时，变压器 Tr 有电，经二极管 VD 整流后，流经热敏电阻向 KA 供电。因热敏电阻此时电阻较小，电路中电流大到足够使 KA 吸合。

若电动机发生单相运行故障，绕组过热使热敏电阻温度升高，阻值增加。电路中的电流下降，继电器 KA 释放，触头断开。最后导致接触器 KM 的线圈断电，电动机脱离电源。

这种方法，不仅适用于电动机的单相运行故障，对电动机的严重过载等过热出现，也可起到保护作用。

七、电动机智能综合保护

电动机智能综合保护是对三相异步电动机常见故障的多种保护，保护的内容主要有过载、短路、失电压、欠电压，漏电和断相等。这种综合保护是把单片机引入电动机综合保护中，使其性能稳定可靠，显示直观、正确，操作方便，保护范围广。智能综合保护装置集成化程度高，抗干扰能力强，工作范围宽，耗电少，具有良好、灵活的显示界面和按键装置，便于各种生产环境中使用，是目前电动机保护装置最先进、最可靠的换代产品。读者可查有关资料，这里不再详述。

第四章　三相异步电动机的绕组及嵌放

三相异步电动机中，定、转子绕组是其重要而又薄弱的部件。因为异步电动机的品种较多，绕组的类型、结构也较为复杂。因此，我们对这个部件必须有清楚的认识，真正地掌握。以在以后的生产、使用和修理中对其多加谨慎和用心。本章主要介绍三相异步电动机定、转子绕组的嵌放原则、规律及接线方法，并举典型例证，以供参考。

第一节　定子绕组概述

一、常用的名词术语

为了表述电动机中绕组的结构特点，这里先介绍几个常用的名词术语。

1. 线匝、线圈、绕组

1）线匝：电磁导线经定子或转子的两个铁心槽绕过一周，称为一个线匝。平时讲的匝间短路或匝间碰线，就是指线匝与线匝之间因绝缘损坏而造成的短路。

2）线圈：由若干个几何形状相同，截面相同的线匝串绕在一起，最后留出一根首端和一根尾端（并绕时则不只一根）的组合体，称为线圈，又称绕组元件。图 4-1 所示为电动机常用线圈示意图。

图 4-1a 所示线圈直接绕制（或套）在磁极铁心上，属于多匝线圈。图 4-1b、图 4-1c 所示为嵌放在铁心槽中的绕组元件，线圈的直线段称为有效边，嵌在铁心槽内，起电磁能量转换的作用。线圈两端伸出槽外的部分为端部，起连接两个有效边的作用。图 4-1d 为多匝线圈的简单表示形式。

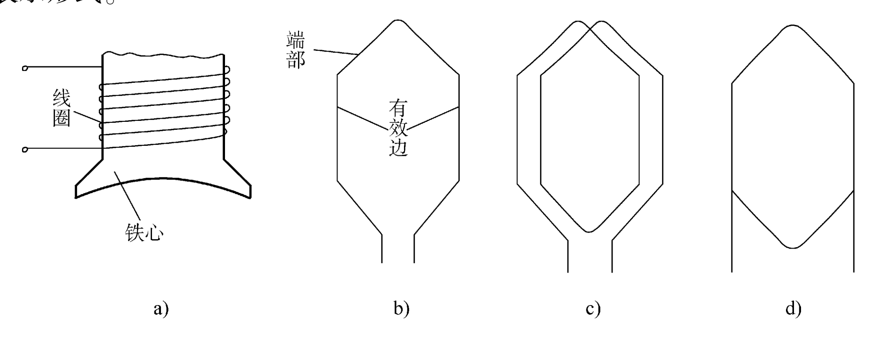


图 4-1　绕组元件（线圈）示意图

3）绕组：由多个线圈按照一定的规律联接起来的整体称为绕组。一般，一相绕组是由若干个线圈通过串联或并联方式接在一起的，所以，绕组是线圈的总称。

2. 磁极、极距

交流电动机的定子绕组通电后，在电动机内产生磁场，形成若干磁极，以 N 极和 S 极成对的形式，在电动机气隙表面圆周上均匀分布。如图 4-2 所示，磁极均是以对数出现，所

以，通常称电动机内若干对磁极，比如2极电动机的磁极对数 $p=1$，4极电动机的磁极对数 $p=2$ 等。电动机磁极数的多少，直接影响着电动机的转速和其他重要性能。而电动机产生多少磁极则取决于绕组的安排和结构。

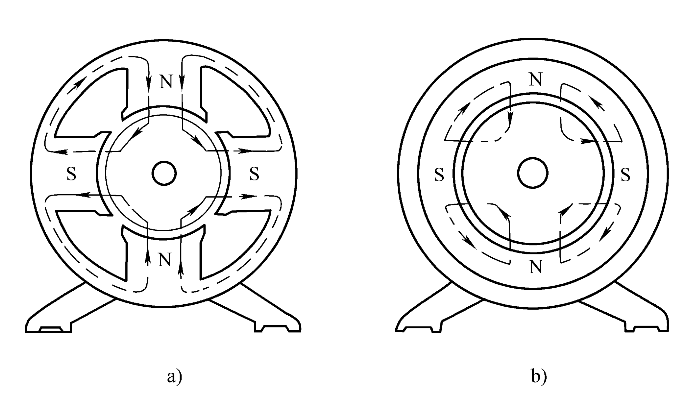


图4-2　电动机的磁场

沿电动机气隙圆周表面上，每相邻两个异性磁极之间的距离（指两个相邻磁极对应点之间）称为极距，用 τ 表示。τ 有槽数和长度两种表示方法。

1）用槽数表示：

$$\tau=\frac{Q}{2p} \tag{4-1}$$

式中　Q——交流电机的定子槽数；

p——磁极对数。

2）用长度表示：

$$\tau=\frac{\pi D_{i1}}{2p} \tag{4-2}$$

式中　D_{i1}——交流电动机定子内径（cm）。

3. 机械角度、电角度和槽电角度

（1）机械角度和电角度

按照机械学的方法，将一圆周划分为360等份，其中一等份为1°，共360°。或者将一圆周划分为2π个弧度，这样划分的角度为机械角度或者几何角度，用 α_m 表示。

在交流电动机中，为了表达方便，往往把一对相邻的磁极在气隙圆周上所占的区间定位360°。这样划分的角度为空间电角度，用 α_e 表示。电角度和机械角度的关系用下式计算：

$$\alpha_e=p\alpha_m \tag{4-3}$$

各种极数的电动机，其铁心一圆周上的电动机角度见表4-1。

表4-1　各种磁极数电动机的机电角度比较

磁极数	2	4	6	8	10	12
磁极对数	1	2	3	4	5	6
机械角数	$\alpha_m=360°$（一圆周）					
电角度	360°	720°	1080°	1440°	1800°	2160°

（2）槽电角度 α

电动机铁心上每槽在圆周上所占的电角度为槽电角度，用 α 表示，可用下式计算：

$$\alpha = \frac{p \times 360°}{Q} = \frac{2p \times 180°}{Q}$$

式中　Q——铁心槽数；

p——磁极对数。

例如：4 极电动机定子槽数为 36，那么：

槽电角度为 $\alpha_4 = \frac{2 \times 360°}{36} = 20°$

6 极电动机定子槽数为 36，那么：

槽电角度为 $\alpha_6 = \frac{3 \times 360°}{36} = 30°$

4. 节距

节距是指一个线圈的两条有效边之间所跨占的槽数。节距又称跨距，用槽数 y 表示，例如 $y = 8$（槽），习惯上以 $y = 1$—9 槽的方式表达，即线圈的一条边嵌放于第 1 槽，另一条边嵌放于第 9 槽，两条边所跨槽的中间距离为 8 槽（第 1 槽和第 9 槽各算半槽）如图 4-3 所示。

当线圈节距 $y = \tau$ 时，称为整距绕组，又称全距绕组；当 $y < \tau$ 时，称为短距绕组；$y > \tau$ 时，称为长距绕组。

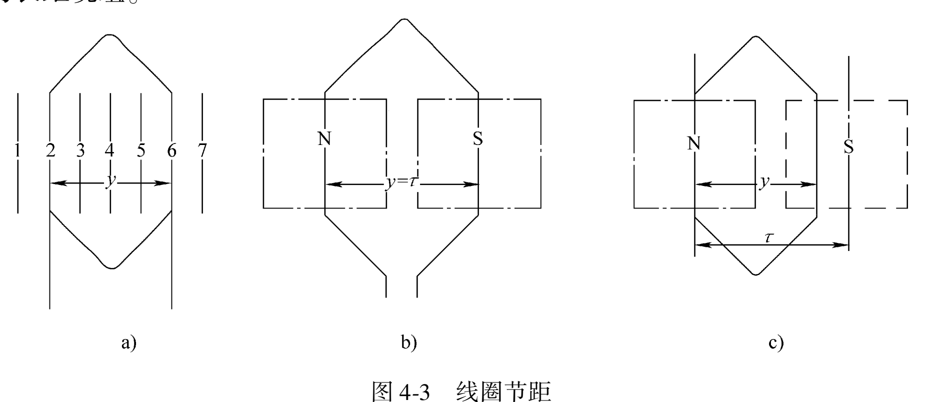


图 4-3　线圈节距

5. 每极每相槽数、相带、极相组

（1）每极每相槽数

对于三相异步电动机，各相定子绕组在铁心内圆上占有相等的槽数，而且，每相不集中在一起。通常，将一相绕组按磁极数均匀分组，每个极距为一组，这样每个极距下每相所占的铁心槽数称为每极每相槽数。用 q 表示。

$$q = \frac{Q}{2mp}$$

例如：某电动机相数 $m = 3$，定子槽数 $Q = 36$，若极数 $2p = 4$，则每极每相槽数 $q_4 = \frac{36}{3 \times 4} = 3$；若 $2p = 6$，则 $q_6 = \frac{36}{3 \times 6} = 2$。

（2）相带

通常，每个极距下每相的槽所占区域则称为相带，用空间电度角表示。对大多数绕组，因为每一极距为 180°，三相绕组均匀分配，故相带为 180°/3 = 60°。称此为 60°相带绕组。

对少数绕组，例如后面讲到的倍极两速电动机中，三相绕组按少数极 60°相带排列，再按多数相改接时，相带则为 120°相带。

对某些特殊结构绕组，其相带还有 30°。例如Y-△混合绕组。

相带不同，绕组的排列、布置和接线形式不同。三相异步电动机中，绝大多数采用的是 60°相带。

（3）极相组

每相绕组是按线圈组在铁心圆周上均匀分布的。每组则由一个或几个线圈连绕而成的。每组线圈则称为极相组。

线圈及每相的极相组数则与电动机的极数、槽数和绕组的嵌放形式有关。

6. 并绕根数和并联路数

（1）并绕根数

对于电流较大的电动机，为了便于线圈的绕制和嵌放，通常不采用单根大截面的导线，而用截面较小的多根导线合并在一起绕制线圈。这合并在一起的导线根数，即称并绕根数。

当拆换铁心中的旧线圈时，须注意线圈是否由多根导线并绕，并应弄清其并绕根数。

（2）并联路数

并联路数又称并联支路数。对于大电流电动机，为了便于线圈的绕制和嵌放，除了上述用截面较小的多根导线并绕线圈的办法外，还可通过接线使一相绕组线圈实现多路并联的办法。这在交流电动机定子绕组中经常采用。但要注意，每个支路的串联导体总数及线规应相同，否则易造成环流发热。所以，不同磁极数的电动机，并联路数的多少应符合以下关系，磁极数 $2p$ 除以并联路数 a 等于整数。

例如：8 极电动机中一相绕组并联路数 a，可以为 2，4，8。

　　　10 极电动机中一相绕组并联路数 a，可以为 2，5，10 等。

7. 集中绕组与分布绕组

（1）集中绕组

对交流电动机而言，在凸极铁心上套制的绕组，及在隐极铁心内，每个磁极下每相绕组只占一个槽，即 $q = 1$，这种绕组均是集中绕组。

（2）分布绕组

分散布置于铁心槽内，每极每相槽数 $q > 1$ 的绕组为分布绕组。大多数三相电动机的定子绕组和转子绕组，都是分布绕组。

8. 显极式绕组和庶极式绕组

（1）显极式绕组

显极式绕组的特点是每个线圈组形成一个磁极，每相线圈组的数目与磁极数相等。在显极式绕组中同一相相邻的线圈组应形成异性磁极，故采用“尾—尾”或“首—首”反串连接。图 4-4 所示为 2 极显极式绕组示意图，图中表示每相有 2 个线圈组，形成 2 个磁极。

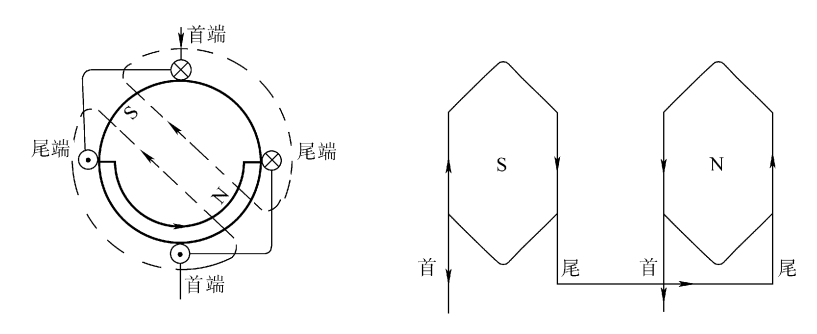


图 4-4　显极式绕组示意图

（2）庶极式绕组

庶极式绕组的特点是每个线圈组形成 2 个磁极，每相线圈组的数目为磁极数的一半。在庶极式绕组中，同一相相邻的线圈组应形成同性磁极，故采用“尾—首”或“首—尾”正串连接。图 4-5 为 4 极庶极式绕组的示意图，图中表示每相有 2 个线圈组，形成 4 个磁极。庶极式接法在三相单绕组多速电动机中较为常用。

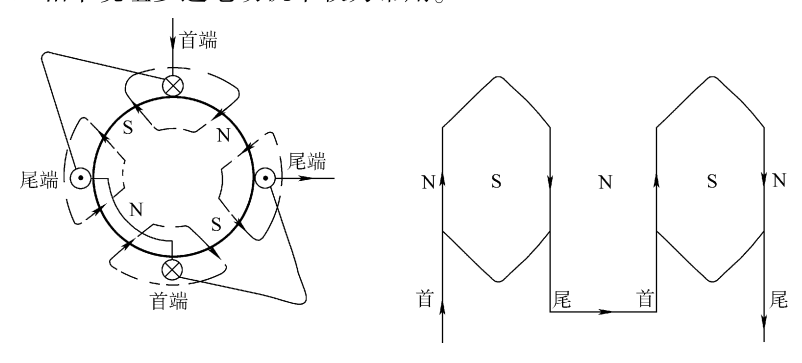


图 4-5　庶极式绕组示意图

二、定子绕组嵌放的基本原则和要求

定子铁心槽内嵌放着三相绕组。根据三相异步电动机的工作原理，当这三相绕组通入三相正弦交流电流后，在气隙中要产生一定磁极数的圆形旋转磁场。为此，三相绕组必须满足以下基本条件：

1）每个线圈的节距 y 等于或接近极距 τ，每相线圈的连接必须使产生的磁场形成一定的极数。

2）三相定子绕组必须完全相同，且在圆周上各相之间的分布互差 120°电度角。此外，考虑到不同功率以及改善性能的要求，还要考虑实际嵌放工艺的难易程度和材料的成本等因素，对定子绕组嵌放时必须遵照以下原则和要求：

1）保证满足上述的两个基本条件，通入三相交流电流后产生一定磁极数的旋转磁场。

2）准确的导线的截面和绕制的线圈匝数能保证电动机功率及电流的要求。

3）对较大容量的电动机优先考虑采用合适形式的绕组，改善电机的性能。

4）对容量较小的电动机在保证电机性能的基础上，则优先考虑其嵌放工艺力求简单方便，且节省材料等。

三、定子绕组的基本形式

为了满足绕组的基本条件，三相定子绕组最基本的嵌放形式如图 4-6 所示。从图 4-6 的各图中可以看出各种磁极数的三相基本形式的定子绕组共同规律。

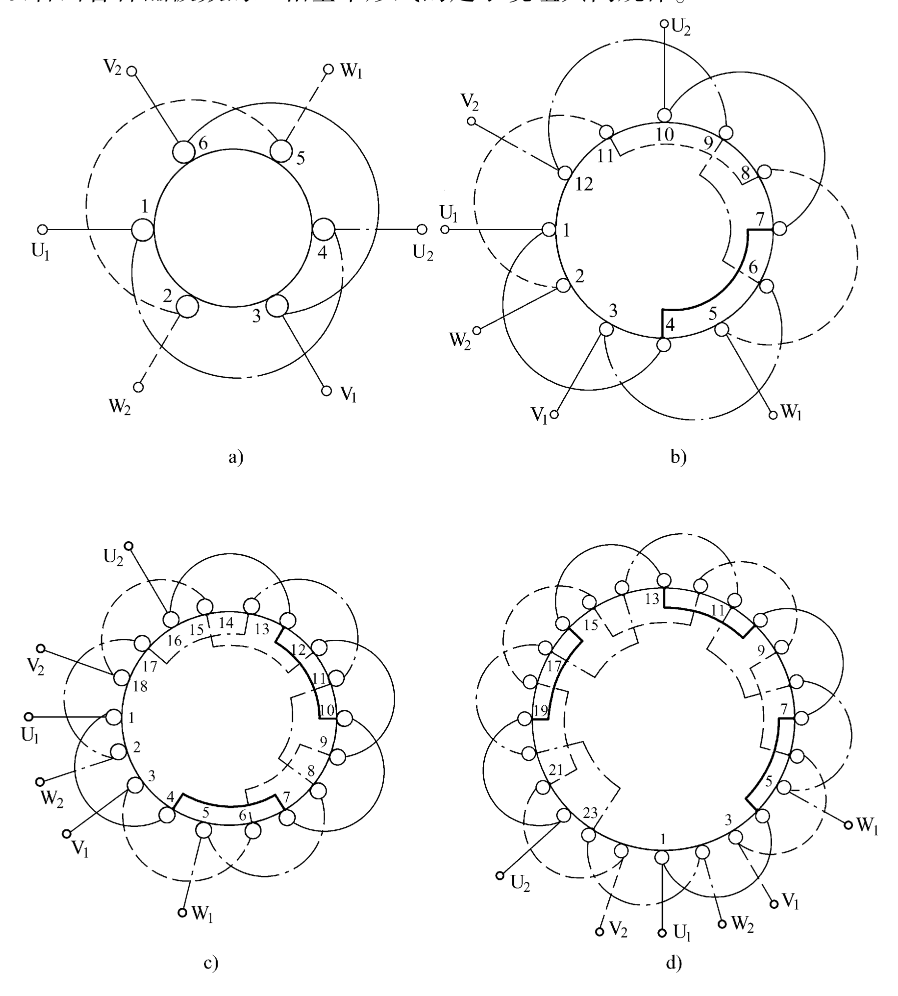


图 4-6　定子绕组的基本形式

a）2 极　b）4 极　c）6 极　d）8 极

1）定子的最少槽数　$Q_{\min}=2mp$

例如：2 极：$Q_{\min}=6$；4 极：$Q_{\min}=12$；6 极：$Q_{\min}=18$；

8 极：$Q_{\min}=24$；10 极：$Q_{\min}=30$；……

对多槽定子铁心内若要嵌放一定磁极数的三相绕组，只要定子槽数 Q 是最少槽数的整倍数，即可容易嵌放。

2）每相绕组的节距 $y=\tau$（互差 180°电度角），且每极每相的槽数 $q=1$（集中绕组）。

3）三相绕组为单层绕组，三相绕组的几何尺寸（还包括线径和匝数）及连接方式完全相同。

4）各相绕组的对应边在圆周上互差 120°电度角，各相带的排列规律为：U W′ V U′ W V′，如此重复。

四、定子实用绕组的改进及种类

定子绕组仅采用上述的基本形式是不够的。同一种磁极数的电动机，还要考虑到功率的大小和其他性能的要求，以及实际嵌放工艺和使用材料的成本等因素。经过长期的多次实践，目前有常用的几种不同形式绕组，供生产实际的需要。

目前三相异步电动机定子绕组的形式及适用范围见表 4-2。

表 4-2　三相异步电动机定子绕组的形式及适用范围

绕组形式			主要适用范围
层数	端部连接方式	绕组排列方式	
单层	同心式	60°相带整数槽	2 极小功率电动机
	链式		$q=2$ 的 4、6、8 极小功率电动机
	交叉式		$q=3$ 的 2、4、6 极小功率电动机
双层	叠绕式	60°相带整数槽	较大功率电动机定子绕组
		分数槽绕组	8 极以上电动机定子绕组及特殊电动机
		混相（散布）绕组	q 值较大的大中型 2 极电动机定子绕组
		电容电动机绕组	试制中的电动机
单双层	同心式	60°相带整数槽	$q>2$ 的中小型电动机定子绕组

五、绕组系数的含义

1. 分布系数 K_d

分布绕组与集中绕组相比，能充分利用空间位置，并有利于散热，还可削弱谐波磁场，优化电动机性能。故一般实际电动机多数采用分布绕组。但是，分布绕组的采用会使每相基波合成电动势有所减小。分布系数 K_d 反映的是其减小的程度。K_d 的计算公式为

$$K_d=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}$$

式中　q——每极每相槽数；

α——槽电角度。

对三相异步电动机：

$$q=\frac{Q}{2pm}$$

式中　Q——定子槽数；

$2p$——磁极数；

m——相数（$m=3$）。

表 4-3 为三相 60°相带绕组的分布系数 K_d 的值。

表 4-3　三相 60°相带绕组的分布系数 K_d 的值

q	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_d	1.000	0.966	0.960	0.958	0.957	0.956	0.956	0.956	0.955

2. 短距系数 K_y

短距绕组较之整距绕组，能显著削弱谐波磁场，优化电动机性能，并可使线圈端部长度缩短，节省铜线。多在双层定子绕组中采用。但是，采用短距后，线圈内基波合成电动势也有所减小，短距系数 K_y 反映的是其减小的程度。K_y 的计算公式为

$$K_y = \sin\left(\frac{y}{\tau} \times 90°\right)$$

式中 τ——极矩；

y——线圈的节距。

要注意，对于三相单层绕组，形式上虽可由短距线圈构成，但绝大多数绕组在电磁本质上仍然为整距绕组，其 $K_y = 1$。

3. 绕组系数 K_w

绕组系数 K_w 是分布系数 K_d 和短距系数 K_y 的乘积，即：

$$K_w = K_d K_y$$

绕组系数 K_w 的含义是电动机绕组采用分布短距绕组后，它表现为每相绕组基波合成电动势减小的程度，在选择绕组时要考虑到这一点。

第二节 三相单层定子绕组及嵌放

在小型三相异步电动机的定子中，单层绕组应用甚广，与双层绕组相比，有如下特点：

1）因为每槽内只嵌放 1 个线圈边，所以电动机的线圈总数等于铁心槽数的一半，节省绕线和嵌线工时。

2）因为槽内只有 1 个线圈边，所以不需要层间绝缘，在槽内不存在相间击穿问题，且槽面积的利用率较高。

3）绕组线圈的端部互相交叠，较厚，整形困难。

4）单层绕组虽然也采用短距绕组，但从电磁性能看，绝大多数绕组仍属整距绕组，故电气性能较差。

单层绕组的最初形式为叠绕式，经过改进有同心式、链式、交叉式及同心交叉式等形式，以适用不同的电动机。

一、单叠绕组及嵌放

单叠绕组是由基本绕组发展而形成的实用单层绕组，它是其他形式绕组的最初形式和基础形式。和基本绕组比，单叠绕组的 $q > 1$（可以是 2，3，4……），所以它每相在 1 对磁极下要放 1 个极相组，这个极相组由 q 个线圈依次串联绕制而成的。每相的若干个极相组之间再串联在一起。这种绕组在容量很小的电动机中以及某些型号电动机中采用。由于它的线圈节距 $y = \tau$，较大，端部用铜线较多，对 q 值较大的电动机而言，绕组嵌放较难，现在逐渐被其他形式绕组所代替，只在个别电动机还应用。

先仅举一例说明对该种绕组形式的排列，绕制、嵌放和接线方法及规律。

【例 4-1】 一台电动机，$2p = 4$，$Q = 24$，单层叠绕组。

排列方法：

1）计算：

$q=\frac{Q}{2mp}=\frac{24}{2\times3\times2}=2$，一个极相组有 2 个线圈

单层绕组共绕制 $mp=3\times2=6$ 个极相组

$$y=\tau=\frac{Q}{2p}=\frac{24}{4}=6(y=1—7)$$

2）每极每相线圈边占 2 槽，为使相绕组的对应边互差 120°，排列顺序：U W′ V U′ W V′。如图 4-7a 所示。

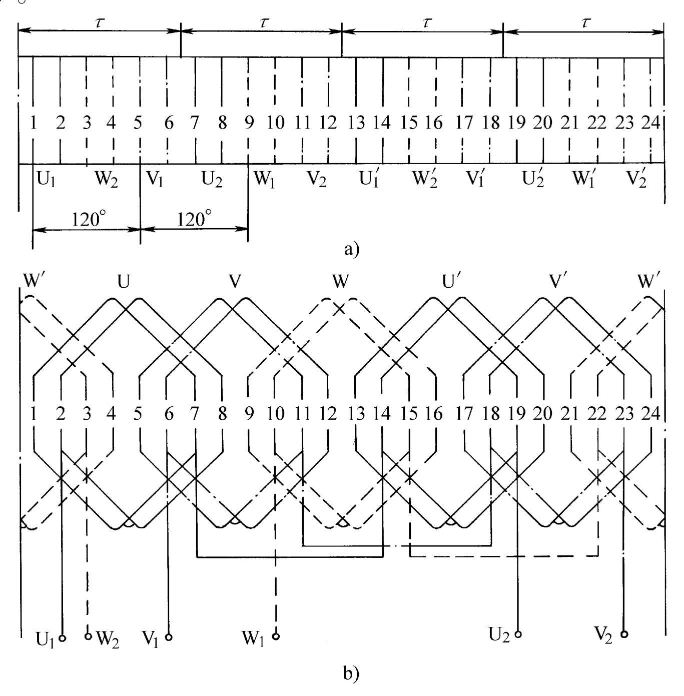


图 4-7　4 极 24 槽单层叠绕组展开图

3）各极相组的组成及位置：如图 4-7b 所示，其中 U U′为 U 相的线圈对应边；V V′和 W W′分别为 V 相和 W 相的线圈对应边。

4）取各相首端，U_1 V_1 W_1 互差 120°，将各相极相组分别按“首尾”相接成 U V W 三相绕组，末端为 U_2 V_2 W_2。如图 4-7b 所示，端视图如图 4-8 所示。

检查方法：设三相交流电流从首端进入（三相交流电流的真实方向是从首端两进一出，或两出一进）图 4-7b 所示。按电流方向划分，正好为四个区域（和磁极数相同），这样排列为正确。否则，必须检查各相位置或接线是否有误。

这里说明一下，在保证上述四个区域电流方向不变的情况下，各相出线端（U_1 V_1 W_1 U_2 V_2 W_2）完全可以灵活安排。比如，U 相首端从槽 2 取，也

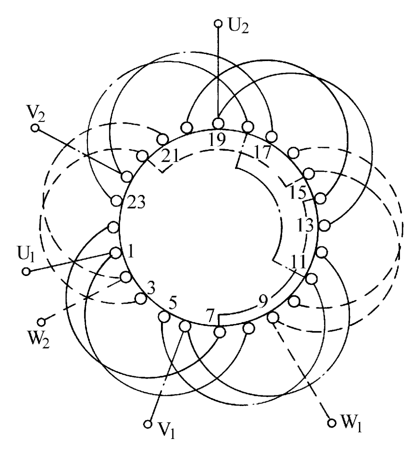


图 4-8　4 极 24 槽单层叠绕组端视图

可在槽 14 取，V 相从槽 6 取，也可从槽 18 取首端，同样 W 相首端从槽 10 及槽 22 取出都一样。既然有这些灵活性，实际的首端和末端选取时，尽可能考虑离出线盒距离近一些。

绕制、嵌放和接线工艺要点：

1）选好绕线模和电磁导线，记住每圈匝数，每 2 个线圈为一组，绕制 6 个极相组。

2）用交叠法嵌放，属常规嵌放。嵌放规律：手握第一个极相组，在铁心中的开始两槽中（图 4-7b 所示的槽 7、槽 8）顺序嵌放两线圈的沉边，另两个浮边吊起。退空 2 槽（槽 9、槽 10），嵌放第二极相组的两个沉边于后 2 槽中（槽 11、槽 12），并再将其浮边嵌放于开始槽的前 2 槽中（槽 5、槽 6），节距为 1—7。退空 2 槽，再嵌放第三极相组的两沉边和两浮边……。

第六个极相组嵌放完毕后，最后将吊起的第一极相组两浮边嵌入两槽中（槽 1、槽 2）。嵌放顺序见表 4-4。

表 4-4　交叠法嵌放顺序

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	沉边	7	8	11		12		15		16		19	
	浮边				5		6		9		10		13
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	沉边	20		23		24		3		4			
	浮边		14		17		18		21		22	1	2

3）将每相的两个极相组“首—尾”依次串联，留出三相的首、末出线端。

二、单层同心式绕组的嵌放

单层同心式绕组是单层叠绕组的改进形式，主要结构特点是极相组是由节距不等，大小不同而中心线重合的线圈组成，故命名同心式。主要优点是一个极相组的线圈端部在一个平面上不重叠，线圈嵌放容易。特别适用于定子内腔较小，节距较大的 2 极小型电动机中。现举例说明这种绕组的排列、绕制、嵌放、接线方法和规律。

【例 4-2】　一台电动机，$Q=24$，$2p=2$，单层同心式绕组。

排列方法：

1）计算：

每极每相槽数：$q=\dfrac{Q}{2mp}=\dfrac{24}{2\times3\times1}=4$

极距：$\tau=\dfrac{Q}{2p}=\dfrac{24}{2}=12$

2）各极相组的组成和位置：由于每极每相占 4 个槽，线圈的组成可以有两种：第一种连绕 4 个大小不等的同心线圈极相组，每相绕一组，全台共 3 组。平均节距 $y=13(1—13)$，这种线圈端部长，用线较多。第二种，将原来 4 个线圈分为 2 个极相组，每个极相组由 2 个同心线圈连绕组成，$y=11(1—12)$ 和 $9(2—11)$，仍然占有原来的相带槽中。显然第二种省线，较适用。

图 4-9 所示为其绕组展开图，图 4-10 为其绕组端视图。

图 4-9　绕组展开图

绕制、嵌放和接线要点：

1）选同心式绕线模和线径，记住匝数，每个极相组由连绕的 2 个同心式线圈组成，共绕 6 组。

2）嵌放有两种方法：

①交叠法，它是正规嵌法。嵌放规律为嵌放 2 槽，退空 2 槽，再嵌放 2 槽，又退空 2 槽，吊边数为 4，嵌放 2 槽沉边，接着嵌放其浮边，退空 2 槽……嵌放顺序见表 4-5。

②整嵌法，它是绕组简易嵌法。交叠法嵌放时，需要吊起 4 个边，对内腔较小的定子嵌放较为困难。整嵌法就是逐相分层嵌放，每相一层，在同一平面上，最后使其绕组端部形成三平面结构，嵌放顺序见表 4-6。

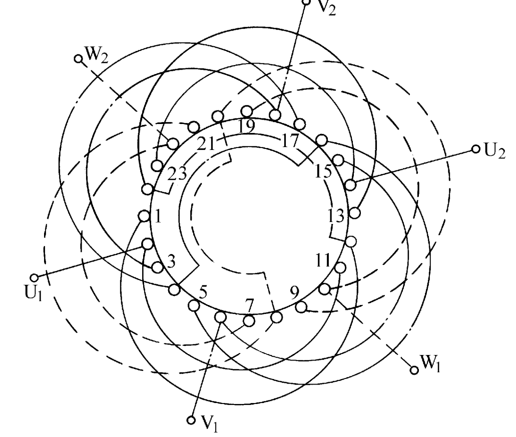


图 4-10　绕组端视图

表 4-5　交叠法嵌放顺序表

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	沉边	11	12	15	16	19		20		23		24	
	浮边						10		9		14		13
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	沉边	3		4		7		8					
	浮边		18		17		22		21	2	1	6	5

表 4-6　整嵌法嵌放顺序表

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	底层	11	2	12	1	23	14	24	13				
	中层									15	6	16	5
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	中层	3	18	4	17								
	上层					19	10	20	9	7	22	7	21

3）每相的两个极相组“首—首”或“尾—尾”依次串联。

三、单层链式绕组的嵌放

单层链式绕组是对 $q=2$ 的单叠绕组另一种改进形式。主要结构特点是所有线圈的形状、大小完全相同，三相线圈的排列如链互扣，故称为链式绕组。主要优点是线圈的节距比单叠绕组及同心式绕组小，端部用铜量少，但电气性能一样，故在 $q=2$ 的 4、6、8 极电动机中应用较多，例如 24 槽 4 极，36 槽 6 极和 48 槽 8 极等三相异步电动机。另外，单层链式绕组可采用无接头嵌放工艺，方便、快捷，所以，它被应用的很普遍。

现举例说明这种绕组的排列、绕制、嵌放和接线方法。

【例 4-3】　一台电动机，$Q=24$，$2p=4$，单层链式绕组。

排列方法：

1）计算：每极每相槽数 $q=\dfrac{Q}{2mp}=\dfrac{24}{2\times3\times2}=2$

计算节距 $y=\tau=\dfrac{Q}{2p}=\dfrac{24}{4}=6(1—7)$（单层叠绕组）

2）在保证各相在各极下所占的槽位置及电气性能（电流方向）和叠绕组完全一样的情况下，采用实际节距 $y=5(1\sim6)$ 的重组短距线圈，且每个线圈为一极相组，全台共 12 个极相组（线圈），每相 4 个。

3）单层链式绕组的展开图如图 4-11 所示，端视图如图 4-12 所示。

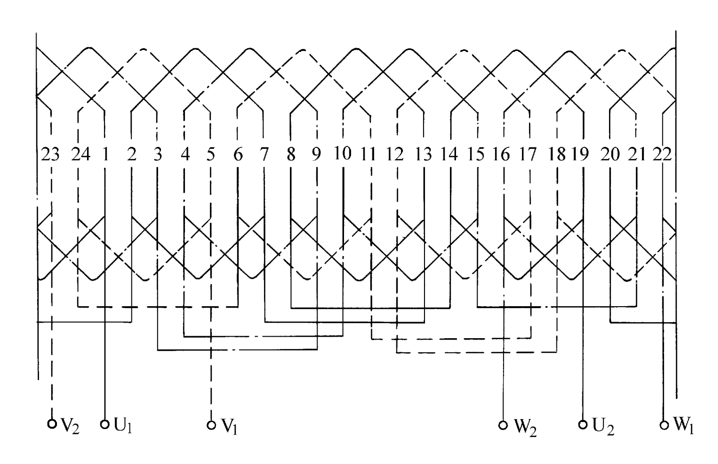


图 4-11　单层链式绕组的展开图

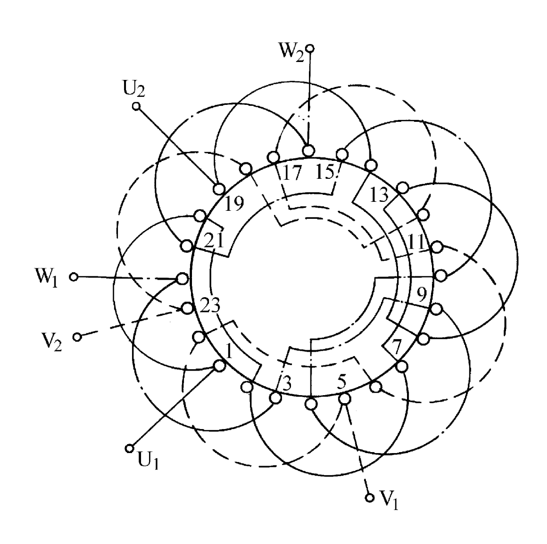


图 4-12　单层链式绕组的端视图

绕制、嵌放和接线要点：

1）选好绕线模和导线，记住每圈匝数，共绕制 12 个相同的线圈，每个线圈为 1 个极相组。

2）嵌放采用交叠法。嵌放规律：嵌放 1 槽沉边退空 1 槽，再嵌放 1 槽沉边再退空 1 槽，再嵌放 1 槽沉边，嵌放其浮边，$y=1—6$，退空 1 槽，吊浮边数为 2，再嵌放沉边和浮边……嵌放顺序见表 4-7。

表 4-7　交叠法嵌放顺序表

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	沉边	1	3	5		7		9		11		13	
	浮边				24		2		4		6		8
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	沉边	15		17		19		21		23			
	浮边		10		12		14		16		18	20	22

3）每相极相组之间接线是“首—首”或“尾—尾”相串联。

若采用无接头嵌放工艺，绕制时，连接 4 个线圈为 1 组，共 3 组。然后按无接头嵌放工艺，将三相绕组边嵌、边翻、边掏……直至嵌完，极相组之间无须接线。图 4-13 所示为无接头绕组端视图。

四、单层交叉式绕组的嵌放

单层交叉式绕组是对 $q=3$ 的单层叠绕组改进形式。主要结构特点是每相绕组由线圈数不等，节距不同的两种线圈组交叉排列构成，因而得名。主要优点：比单层叠绕组的端部用铜量减少，而且也可采用无接头绕组。故在 $q=3$ 的 2、4、6……极电动机中经常应用。例

如：18 槽 2 极，36 槽 4 极，54 槽 6 极，72 槽 8 极等小型三相电动机。现举例说明这种绕组的排列、绕制、嵌放和接线方法。

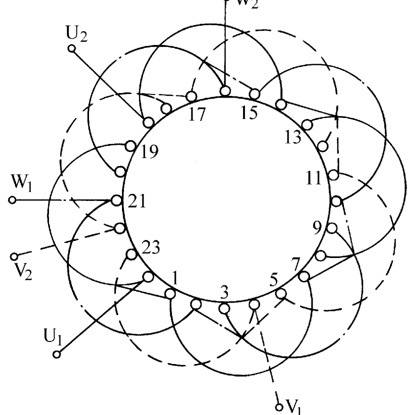


图 4-13　无接头绕组端视图

【例 4-4】 一台电动机，$Q=36$，$2p=4$，交叉式绕组。

排列方法：

1）计算：每极每相槽数 $q=\dfrac{Q}{2mp}=\dfrac{36}{2\times3\times2}=3$

计算节距 $y=\tau=\dfrac{Q}{2p}=\dfrac{36}{4}=9(1—10)$（叠绕组）

2）在保证各相在各极下所占的槽位置及电气性能（电流方向）和叠绕组完全一样的情况下，采用实际节距 $y_1=8(1—9)$ 两个线圈为一组；$y_2=7(1—8)$，一个线圈为一组，重组线圈组。两个线圈为一组共 6 组，1 个线圈为一组共 6 组，每相的极相组“首—首”，“尾—尾”串联。

3）单层交叉式绕组的展开图如图 4-14 所示，端视图如图 4-15 所示。

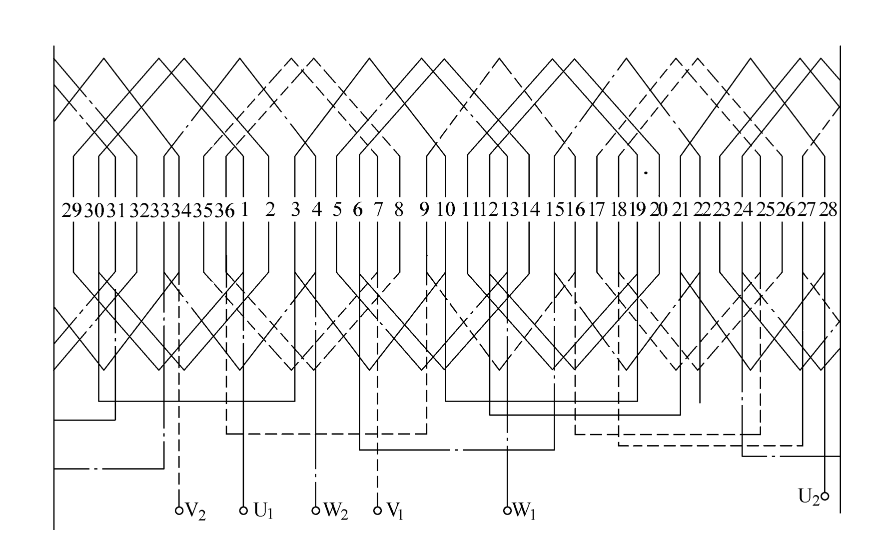


图 4-14　单层交叉式绕组的展开图

绕制、嵌放和接线要点：

1）选好绕线模和导线，记住每圈匝数。先绕制 $y=(1—9)$，且两个线圈连绕为一组，共 6 组，称为大组；再绕制 $y=(1—8)$，且一个线圈为一组，共 6 组，称为小组。

2）采用交叠法嵌放。嵌放规律：先嵌放 2 槽大组的沉边，退空 1 槽，再嵌放 1 槽小组的沉边，退空 2 槽，再嵌 2 槽大组的沉边，并嵌其浮边，退空 1 槽……吊边数为 3，嵌放顺序见表 4-8。

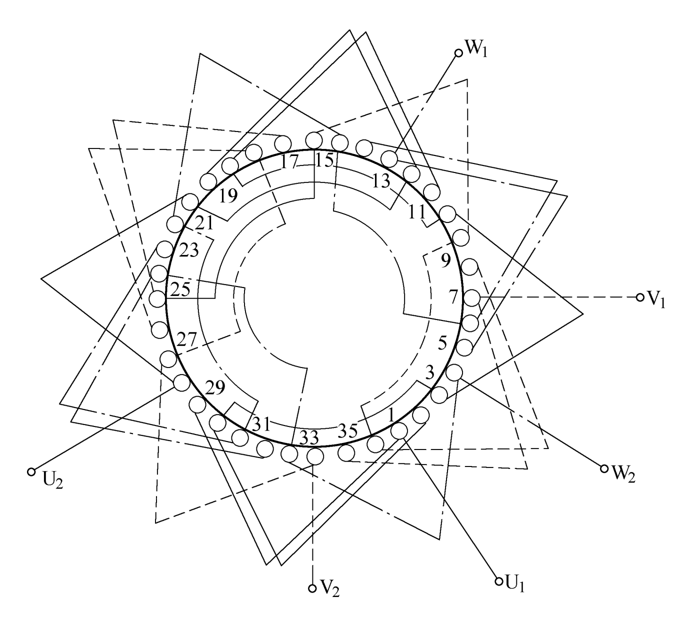


图 4-15　单层交叉式绕组的端视图

表 4-8　交叠法嵌放交叉式绕组

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	沉边	1	2	4	7		8		10		13		14		16		19		20
	浮边					35		36		3		5		6		9		11	
嵌放顺序		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
槽号	沉边		22		25		26		28		31		32		34				
	浮边	12		15		17		18		21		23		24		27	29	30	33

3）每相的极相组采用“首—首”或“尾—尾”串联连接成三相。

和单层链式绕组一样，单层交叉式绕组也可采用一相连绕，用无接头嵌放工艺嵌放三相绕组。图 4-16 所示为无接头线圈组端视图。

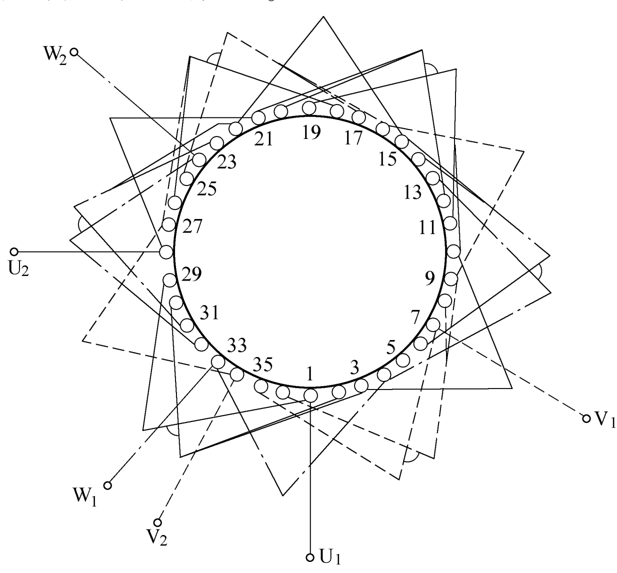


图 4-16　4 极 36 槽单层交叉式无接头绕组端视图

五、单层同心交叉式绕组的嵌放

单层同心交叉式绕组是将交叉式绕组中 2 个相同线圈为一组的极相组（大组）改为同心式线圈绕制，它同时具备了同心式和交叉式绕组的优点，对 $q=3$，且极数为 2 的小功率电动机嵌放尤其方便，现以 $Q=18$，$2p=2$ 的电动机为例说明。

【例 4-5】 一台电动机，定子 $Q=18$，$2p=2$，嵌放单层同心交叉式绕组。

排列方法：

1）计算：每极每相槽数 $q=\dfrac{Q}{2mp}=\dfrac{18}{2\times3}=3$

计算节距 $y=\tau=\dfrac{Q}{2p}=\dfrac{18}{2}=9(1—10)$（单层叠绕组）

2）在保证各相绕组在每极下所占的槽位置及电气性能（电流方向）和叠绕组完全一样的情况下，实际采用了节距（1—10）和（2—9）两线圈套装在一起的同心式绕组以及节距为（1—8）的一个线圈为一组。每相的两种极相组间隔嵌放。

3）绕组端视图如图 4-17 所示。

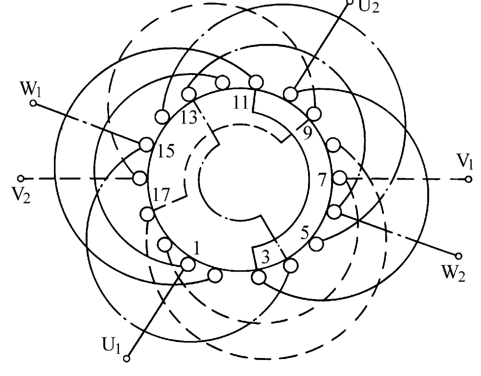


图 4-17　绕组端视图

绕制、嵌放和接线工艺要点：

1）选好同心式绕线模（y 为 1—10 和 2—9）和另一绕线模（y 为 1—8），以及导线，记住每圈匝数，绕制同心式极相组 6 组（设为大组），绕制一个线圈为一组的也为 6 组（设为小组）。

2）有两种嵌放方法：

①交叠法：嵌放大组的沉边于 2 槽，退空 1 槽，嵌放小组的沉边于 1 槽，吊起 3 个浮边，退空 2 槽，嵌放大组的沉边于 2 槽，并将其浮边也嵌入槽中，再退空 1 槽，嵌放小组的沉边和浮边……如此循环，待嵌完后，将吊起的 3 个浮边再嵌入槽中，嵌放顺序见表 4-9。

表 4-9　交叠式嵌放顺序表

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	沉边	1	2	4	7		8		10		13		14		16				
	浮边					18		17		3		6		5		9	11	12	15

②整嵌法：对内腔窄小的定子采用吊边嵌放会增加嵌放的难度，所以可将绕组逐相分层嵌放，先嵌 U 相，再嵌放 V 相和 W 相，这样嵌放容易。嵌放顺序见表 4-10。

表 4-10　整嵌法嵌放顺序表

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	底层	1	12	2	11	10	3												
	中层							4	15	6	13	5	14						
	面层													7	18	8	17	16	9

3）各相极相组之间仍是“首—首”或“尾—尾”相串联。

六、单层短距链式绕组的嵌放

前面所说的几种单层绕组形式虽然有的采用了短距线圈，但其仅仅节约了铜线材料，从电磁性能上看仍属单层整距叠绕组，电气性能较差。这并不是说所有单层绕组都属于整距绕组。单层短距链式绕组即属于短距类型的绕组，嵌放规律简单，电气性能又得到了改善。这种绕组在一些油泵电动机中获得了应用。

【例4-6】 一台电动机，定子 $Q=18$，$2p=2$，采用单层短距链式绕组，排列特点：

1）每极每相槽数 $q=\dfrac{Q}{2mp}=\dfrac{18}{2\times3\times1}=3$

2）计算节距 $y=\tau=\dfrac{Q}{2p}=\dfrac{18}{2}=9(1—10)$（单层叠绕组）

3）实际排列时，取 $y=7(1—8)$，且每相在每极下所占的槽不和前面一样，3个槽不连续，绕组分布较广。

绕组展开图如图4-18所示，绕组端视图如图4-19所示。

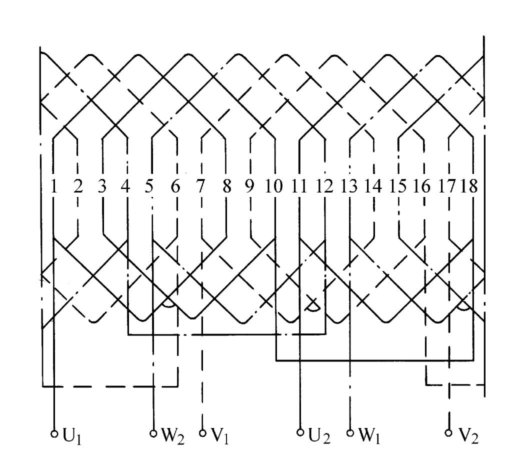



图4-18　绕组展开图

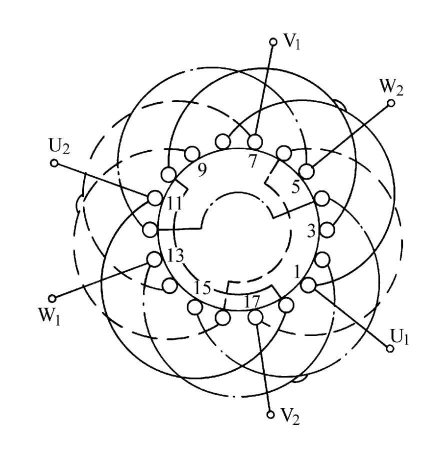


图4-19　绕组端视图

嵌放工艺要点：

1）选好绕线模（尺寸、形状都相同）和导线，记住每圈匝数。每相绕2个极相组，其中一个极相组含2个连绕的线圈，另一个极相组只含一个线圈，所有线圈完全相同。

2）嵌放方法有两种：

①交叠法：先嵌放两个线圈连绕极相组的沉边，且嵌放1槽退空1槽，再嵌放1槽，退空1槽，再嵌放含1个线圈极相组的沉边，三个浮边暂时吊起；退空1槽，嵌放连绕极相组第一个线圈的沉边和浮边，（$y=1—8$），退空1槽，再嵌放第二个线圈的沉边和浮边，退空1槽……最后，将吊边嵌放槽内。嵌放顺序见表4-11。

②整嵌法：也可逐相分层嵌放。先嵌放U相，再嵌放W相和V相，分层嵌放不用吊边，这样比较容易。嵌放顺序见表4-12。

表 4-11　交叠法嵌放顺序

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	沉边	8	10	12	14		16		18		2		4		6				
	浮边					7		9		11		13		15		17	1	3	5

表 4-12　整嵌法嵌放顺序

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	底层	8	1	10	3	18	11												
	中层							12	5	2	13	4	15						
	面层													14	7	16	9	6	17

3）各极相组之间采用“首—首”或“尾—尾”串联。

此种绕组形式对4极36槽，6极54槽电动机也适用。通过计算，其绕组系数 $K_W = 0.9$，发现和其同槽双层叠绕组（后面介绍）$y = 7(1—8)$ 的绕组系数相同。

第三节　三相双层定子绕组及嵌放

一、整数槽双层叠绕组及嵌放

前面说过，单层绕组的端部较厚，整形较难。当电动机容量较大，导线较粗时，这个缺点更显突出。此外，构成短距的单层绕组只占少数，也限制了它的应用范围。因此在较大容量的三相电动机定子中，大多采用双层叠绕组，和单层绕组比较，双层叠绕组主要有如下特点：

1）双层叠绕组可选最有利的节距以削弱气隙磁场中的高次谐波，改善电动机的电气性能，容量越大这个优点就越明显。

2）每个槽内分上、下两层线圈边，相对每个线圈的匝数比单层少一半，大容量电动机嵌放线圈时就显得容易。

3）各线圈形状、大小一样，相互重叠，嵌放后的绕组端部整齐美观。

4）由于线圈数的增加，绕制和嵌放工时较多。此外，槽内还需要放置层间绝缘，故槽面积利用率低，绝缘材料用得多。

5）有的槽内嵌放两相线圈，容易发生相间短路故障，在嵌放时必须垫好层间绝缘。

双层叠绕组可分整数槽（q = 整数）绕组和分数槽（q = 分数）绕组。这里先介绍整数槽双层叠绕组的嵌放规律和接线方法。

1. 线圈绕制特点

1）一台电动机定子槽数若为 Q，线圈共绕制 $S = Q$ 个，且每个线圈的匝数、形状、尺寸完全相同。

2）计算出每极每相的槽数：$q = \dfrac{Q}{2pm}$，这样每 q 个线圈连绕为一个极相组，共计 $\dfrac{Q}{q}$ 个极相组，各极相组相同。

2. 嵌放方法及规律

1）先确定线圈的节距 y，通常取

$y = (0.7 \sim 0.9)\dfrac{Z}{2p} = (0.7 \sim 0.9)\tau$　（取整数）。

2）因为双层叠绕组的每个线圈的一个边放在槽的下层（称下层边），另一个边必须放在另外槽的上层（称上层边），所以下层边和上层边在各槽的排列位置规律是一样的，一般选下层边来排列，那么上层边只和下层边相差 y 个槽距离。

3）根据计算的每极每相槽数 q，按下层边排列情况是每一个极相组（占 q 个槽）为一相，其顺序为：U 相、W′相、V 相，U′相、W 相、V′相，如此循环。先嵌放 y 个下层边，吊起 y 个上层边后，再嵌一个下层边后，即嵌放上层边，如此嵌放，直至下层边全部嵌完后，最后再依次嵌放吊起的上层边。

【例 4-7】 一台 4 极 36 槽电动机定子，嵌放双层叠绕组。

1）选节距 $y=(0.7\sim0.9)\dfrac{Q}{2p}=0.8\times\dfrac{36}{4}=7.2$

取 $y=7$，即 $y=1—8$。

2）计算：$q=\dfrac{Q}{2pm}=\dfrac{36}{4\times3}=3$，绕$\dfrac{S}{q}=\dfrac{36}{3}=12$ 个极相组，每个极相组含 3 个连绕的线圈。

3）嵌放的步骤称为交叠法，先连着嵌放 2 个极相组的 6 个下层边，当嵌完第 3 个极相组的第 2 个下层边后（即第 8 个槽），即可将其上层边放在第一槽的上层，以后循环。嵌线顺序见表 4-13。且参看其绕组展开图（见图 4-20）和端视图（见图 4-21）。

表 4-13　交叠法嵌放顺序

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	下层	1	2	3	4	5	6	7	8		9		10		11		12		13
	上层									1		2		3		4		5	
嵌放顺序		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
槽号	下层		14		15		16		17		18		19		20		21		22
	上层	6		7		8		9		10		11		12		13		14	
嵌放顺序		37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
槽号	下层		23		24		25		26		27		28		29		30		31
	上层	15		16		17		18		19		20		21		22		23	
嵌放顺序		55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
槽号	下层		32		33		34		35		36								
	上层	24		25		26		27		28		29	30	31	32	33	34	35	36

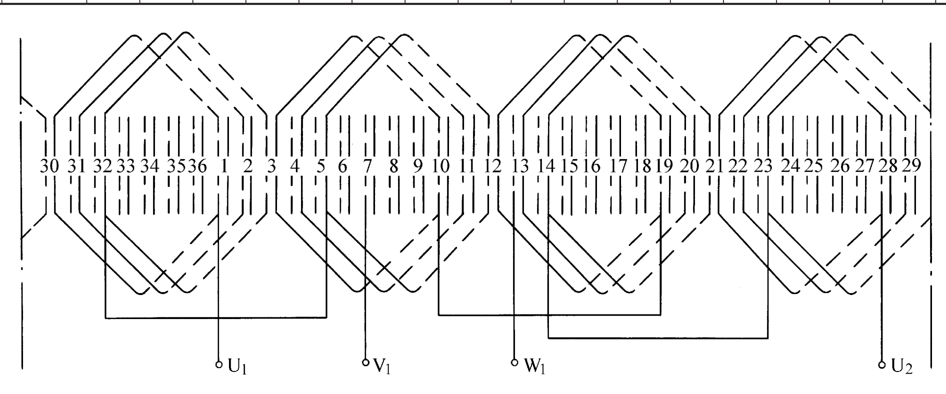


图 4-20　4 极 36 槽双层叠绕组展开图

3. 接线方法和规律

由于双层叠绕组多在较大容量的电动机中采用，所以这种绕组需要接成多路并联支路。前面已经说过，一台电动机能接成多少支路，只要符合公式$\frac{2p}{a}$（a 为路数）是整数就可以。例如 4 极电动机，每相绕组可接为 $a=1$；$a=2$ 或 $a=4$ 路。所接的路数不同，绕组接线方法也不同，但是有一定规律。

例如：对【例 4-7】的 4 极 36 槽电动机双层叠绕组，如果接成一路的绕组（$a=1$），则有以下方法接成：

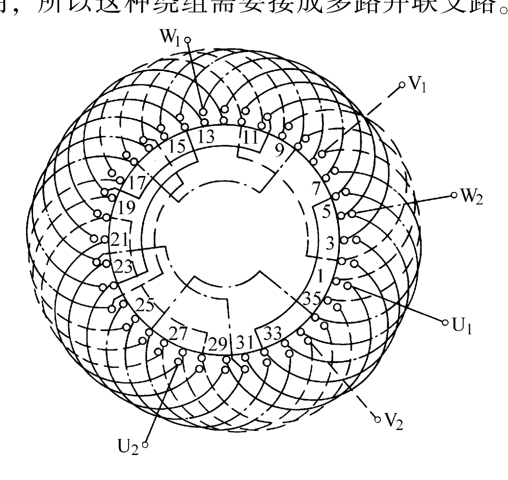


图 4-21　双层叠绕组端视图

为方便看清接线，常用圆形简化接线图，如图 4-22a 所示。图中先画出 12 个极相组（符号），每个极相组的右边出线端表示下层出线端（称首端），左边出线端表示上层出线端（称尾端），12 个极相组在圆周上按 1、2、3……12 依次排列（和实际嵌放次序一样）。

先确定各相绕组的出线首端，常有两种方法：

1）取极相组 1、3、5 的首端分别为 U、V、W 相的首端，称 U_1、V_1、W_1。俗称 1、3、5 出线，如图 4-20a 所示。

2）或取极相组 1 的首端为 U_1，极相组 2 的尾端为 W_1，极相组 3 的首端为 V_1。俗称 1、2、3 出线。如图 4-22b 所示。

各相的首端确定后，再找出各相的极相组。当第 1 个极相组定为某相后，每隔两个（第 4 个）即是该相的极相组。

本电动机的 1、4、7、10 个极相组为 U 相，3、6、9、12 个极相组为 V 相，5、8、11、2 个极相组为 W 相。

然后，将各相按“首—首”，“尾—尾”依次串联连接后，即得出 U_2、V_2、W_2 端。

若在图 4-22a 和图 4-22b 一路接法的圆形简化图中各相首端通一试验电流后，不难发现，各极相组电流方向均相反（图中电流箭头指向相反），这是一个重要规律。按此规律，即可顺利地在图 4-22c 和图 4-22d 图中接为 2 路或 4 路接线图。

以图 4-22c 两路接线为例说明接法：如前一样确定各相的极相组，并标出各极相组的电流方向（各组电流方向相反）。

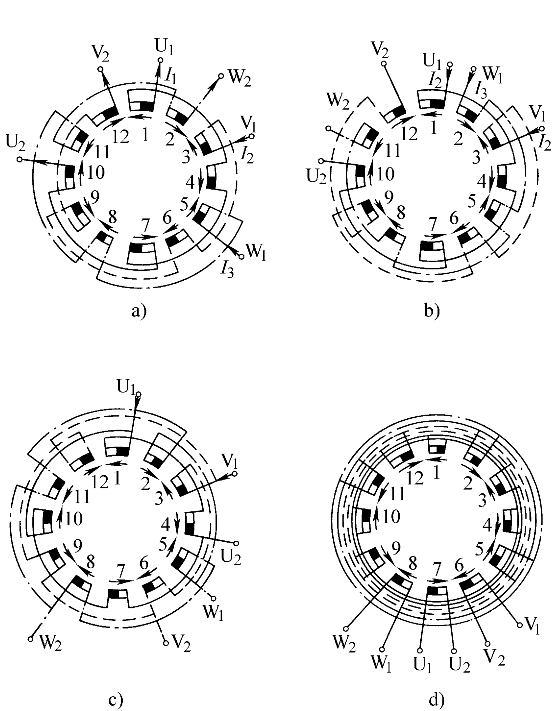


图 4-22　圆形简化接线图

每相4个极相组中，相邻的两个为一路，按电流的方向依次串联，然后再按电流方向将两路并联，得出该相的首、尾端。

图4-22d中的4路接法将每相的4个极相组按电流方向并联成4条支路后，即可确定各相的首、尾端。

依照上述接线规律，对多极多路电动机绕组接线前，最好画出它们的圆形简化接线图，再按图形联接实际的电动机绕组。这样可避免接线错误。此外，在确定各相的首、尾端时，尽可能使它们离电动机的出线盒近一些，防止出线端部过长。

二、分数槽绕组及嵌放

三相定子绕组在空间的分布必须保证三相电动势、电流及磁场的平衡，否则就不能成为对称三相绕组。前面所讲的，当q等于整数时，无论单层或双层叠绕组，由于各相绕组在各极下的分布情况都相同，因此很容易成为三相对称绕组，但是，有的电动机由于各方面的原因，使q等于分数，这样，不可能将槽分割成为分数，也不可能制成分数线圈来嵌线，只有采用不同于前面的方法来安排三相绕组，这就是分数槽绕组。

分数槽绕组在某些电动机中经常遇到。例如多速变极异步电动机，当改变极数时，就会碰到这种情况。有的电机厂为了提高电动机定子铁心的利用率，常把一种磁极数的定子冲片在其他磁极下使用，也会采用分数槽绕组。在修理电动机时，有的遇到需要改极修理，也会遇到分数槽等等。

遇到分数槽电动机时，定子绕组的分布原则是在每个磁极下允许各相占有不同的槽数，但必须有规律地分配每相线圈于各磁极下，使每相线圈总数相等，达到三相平衡。

1. 检验能否嵌放三相对称绕组的方法

一台三相异步电动机计算出的q为分数槽，是否能嵌放成三相对称绕组需要满足以下公式：

$$\frac{Q}{3t}=\text{整数}$$

式中，t表示极对数p与槽数Q的最大公约数。

【例4-8】 30槽定子能否嵌成4极三相对称绕组？

答：此台电动机的每极每相槽数为

$$q=\frac{Q}{2pm}=\frac{30}{4\times3}=2\ \frac{1}{2}$$

是分数槽，极对数2与槽数30的最大公约数t等于2，得到

$$\frac{Q}{3t}=\frac{30}{3\times2}=5$$

是整数，故能嵌放成4极三相对称的双层叠绕组。

【例4-9】 30槽定子能否嵌放6极三相对称绕组？

答：此台电动机的每极每相槽数为

$$q=\frac{Q}{2pm}=\frac{30}{6\times3}=1\ \frac{2}{3}$$

是分数槽，极对数3与槽数30的最大公约数t等于3，得到

$$\frac{Q}{3t}=\frac{30}{3\times3}=3\ \frac{1}{3}$$

是非整数，故不能嵌放成 6 极三相对称的双层叠绕组。

2. 分数槽绕组的排列配置方法

先通过实例予以说明，然后得出其排列配制规律。

【例 4-10】 试确定 27 槽 6 极定子绕组的排列配制。

1）先检验：

$$q=\frac{Q}{2pm}=\frac{27}{6\times3}=1\ \frac{1}{2}$$

属分数槽，极对数 3 与槽数 27 的最大公约数 t 等于 3，得到

$$\frac{Q}{3t}=\frac{27}{3\times3}=3$$

是整数，能配制成三相对称绕组。

2）排列配制：和前面双层叠绕组一样，只考虑下层边的排列，上层边和下层边相差节距 y 为

$$y=\frac{Q}{2p}\mp\varepsilon=\frac{27}{6}-\frac{1}{2}=4$$

下层边的配制：因为每相有$\frac{Q}{3}=\frac{27}{3}=9$ 个线圈，这样分配到 6 个磁极下，每相可以制成 3 个极相组，含 2 个线圈，3 个极相组只含一个线圈。同时，三相的极相组在铁心内交替布置，见表 4-14，图 4-23 所示为 U 相绕组的展开图。

表 4-14　6 极 27 槽分数槽绕组线圈排列

N	*S*	*N*	*S*	*N*	*S*
U　W　V	U　W　V	U　W　V	U　W　V	U　W　V	U　W　V
2　1　2	1　2　1	2　1　2	1　2　1	2　1　2	1　2　1

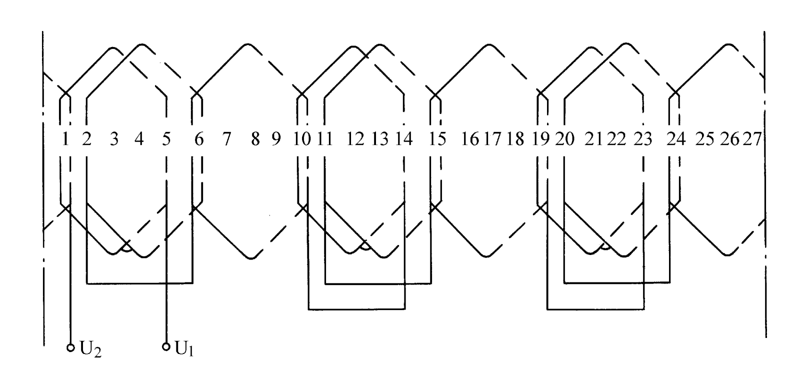


图 4-23　6 极 27 槽绕组展开图（U 相）

根据上例及其他例解可得出分数槽绕组的排列配置规律：

1）设每极每相槽数 $q=B\ \frac{c}{d}$，则各极相组必由 B 个及（$B+1$）个线圈组成，其排列次序每经 d 个极相组循环一次。

2）每次循环的 d 个极相组中，有 c 个极相组含有（$B+1$）个线圈，（$d-c$）个极相组

含有 B 个线圈。

3）循环次数 = 总极相组数除以 d。

一般情况下，$\frac{c}{d}$的值为$\frac{1}{2}$、$\frac{1}{4}$、$\frac{3}{4}$、$\frac{1}{5}$、$\frac{1}{7}$等，其绕组排列见表 4-15。

表 4-15　常见分数槽绕组的极相组排列

$\frac{c}{d}$的值	极相组的循环(排列)
$B\frac{1}{2}$	B、$(B+1)$;B、$(B+1)$;B、$(B+1)$等
$B\frac{1}{4}$	B、B、B、$(B+1)$;B、B、B、$(B+1)$或B、B、$(B+1)$、B;B、B、$(B+1)$、B或B、$(B+1)$、B、B;B、$(B+1)$、B、B等
$B\frac{3}{4}$	B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$;B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$等
$B\frac{1}{5}$	B、B、B、B、$(B+1)$;B、B、B、B、$(B+1)$或B、B、$(B+1)$、B、B;B、B、$(B+1)$、B、B等
$B\frac{2}{5}$	$(B+1)$、$(B+1)$、B、B、B;$(B+1)$、$(B+1)$、B、B、B或$(B+1)$、B、$(B+1)$、B、B;$(B+1)$、B、$(B+1)$、B、B等
$B\frac{3}{5}$	B、B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$;B、B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$或B、$(B+1)$、B、$(B+1)$、$(B+1)$;B、$(B+1)$、B、$(B+1)$、$(B+1)$等
$B\frac{1}{7}$	B、B、B、B、B、B、$(B+1)$;B、B、B、B、B、B、$(B+1)$等
$B\frac{2}{7}$	$(B+1)$;B、B、$(B+1)$、B、B、B;等
$B\frac{4}{5}$	B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$;B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$等
$B\frac{3}{7}$	$(B+1)$、B、$(B+1)$、B、$(B+1)$、B、B;等
$B\frac{5}{7}$	B、$(B+1)$、$(B+1)$、B、$(B+1)$、$(B+1)$、$(B+1)$;等

3. 绕组的嵌放和接线

分数槽绕组也属于双层叠绕组，所以嵌放的方法除注意排列顺序外，其他均和整数槽绕组相同，其接线也一样，但要注意在接多路时一定要考虑各支路的平衡。

【例 4-11】 试绕制嵌放 4 极 27 槽电动机的定子绕组。

解：

1）检验：

$$q=\frac{Q}{2pm}=\frac{27}{4\times3}=2\ \frac{1}{4}$$

属分数槽，极对数 2 和槽数 27 最大公约数 $t=1$。

则$\frac{Q}{3t}=\frac{27}{3\times1}=9$ 是整数，能嵌放三相对称绕组。

2）绕组的排列配置：因为 $q=2\frac{1}{4}$，即 $B=2$，$c=1$，$d=4$。各极相组分别由 2 个与 2 + 1 = 3 个线圈组成，且 4 个极相组为一循环。每次循环中有 1 个极相组含 3 个线圈，3 个极相组含 2 个线圈，共有 $2pm=4\times3=12$ 个极相组，查表 4-11，排列顺序见表 4-16。

表 4-16　4 极 27 槽电机绕组排列

N	*S*	*N*	*S*
U　W　V	U　W　V	U　W　V	U　W　V
2　2　2	3　2　2	2　3　2	2　2　3

3）绕组的嵌放和接线：绕组按双层叠绕组嵌放和接线，其中：

$$y=\frac{Q}{2p}\mp\varepsilon=\frac{27}{4}-\frac{3}{4}=6,(1\sim7)$$

绕组嵌放和接线如图 4-24（展开图）和图 4-25（圆形简化接线图）所示。

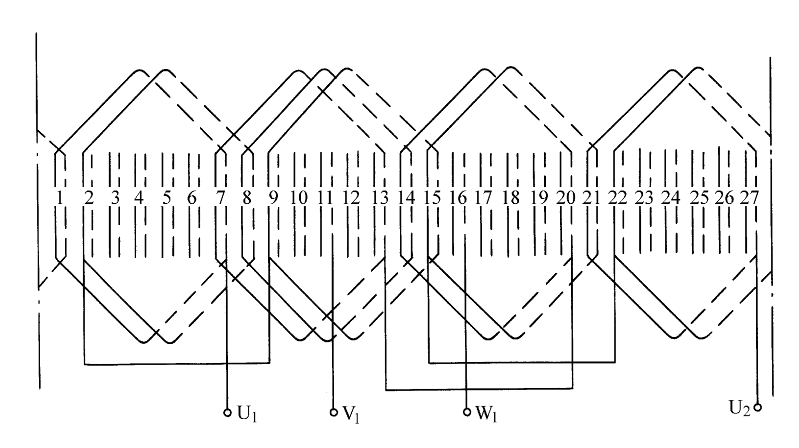


图 4-24　4 极 27 槽电动机的定子绕组展开图

三、单双层绕组及嵌放

单双层绕组是在双层短距叠绕组的基础上演变过来的。双层叠绕组当采用短距后，使一些槽内的上、下层导体不属同一相，但仍有一些槽内的上、下层导体同属一相。若将槽内同属一相的上、下层有效边合并成一个单层大线圈，而同槽不同相的上、下层有效边仍保持原样不变，这样就构成了单双层混合绕组。

【例 4-12】　一台 2 极 18 槽双层短距绕组。图 4-26a 所示为双层短距绕组中的 U 相原来分布情况。若保持原来的电磁性能不变，可把同属 U 相的 1、2 槽及 10、11 槽的上、下层边合并在一起，而使 3、9 槽及 12、18 槽的上、下层边保持原样不变，则端面结构变成了同心线圈式的单双层绕组，如图 4-26b 所示。

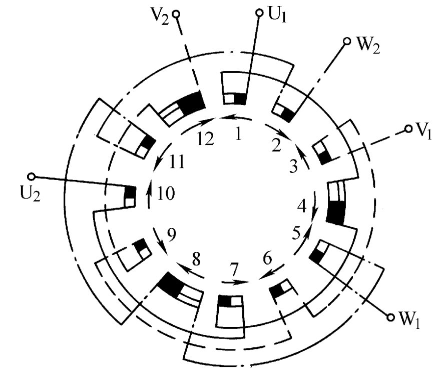


图 4-25　4 极 27 槽圆形简化接线图

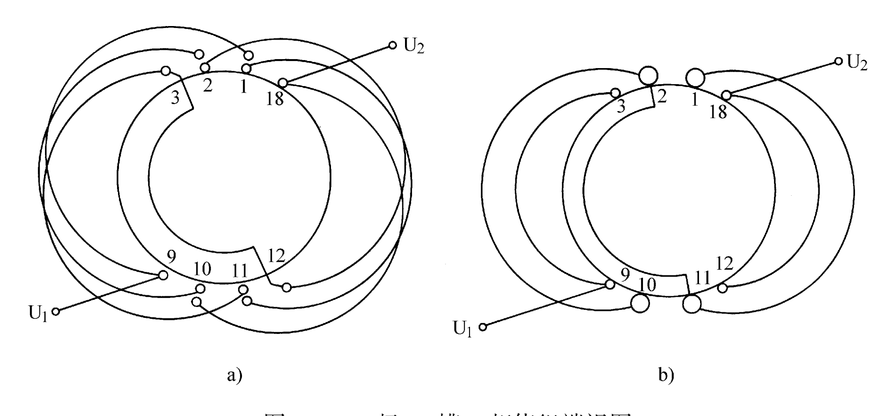


图 4-26　2 极 18 槽 U 相绕组端视图

a）双层短距绕组（U 相）　b）单双层绕组（U 相）

可见，单双层绕组每相由一个或多个外面为单层的大线圈，里面为双层小线圈的线圈组构成。相邻大线圈在端部也不互相交叉，排列起来方便。另外改后的部分单层绕组也省掉了槽中的层间绝缘，节约了材料。故在实际中单双层绕组得到应用。图 4-27 所示为这台电动机三相绕组的展开图，图 4-28 所示为其端视图。

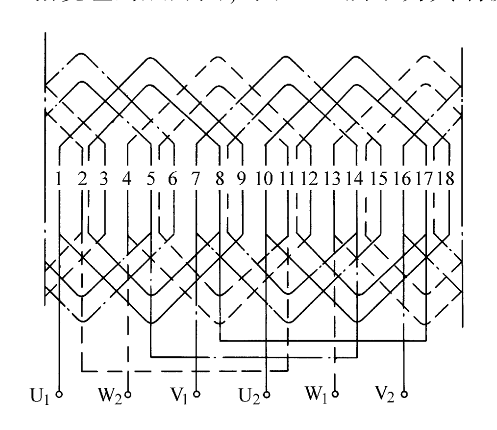


图 4-27　2 极 18 槽单双层绕组展开图

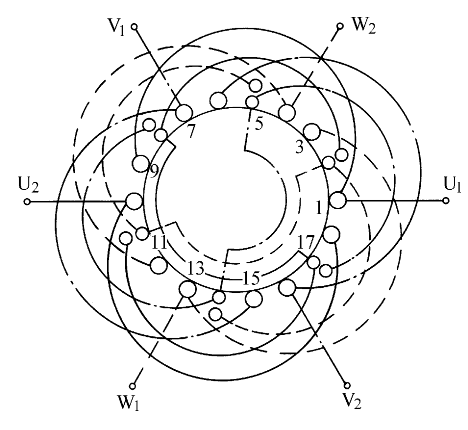


图 4-28　单双层绕组端视图

单双层绕组的极相组由同心线圈组成，大线圈是单层，小线圈是双层，两者不仅大小不同，且匝数也不相等，在绕制时一定要注意，嵌放方法基本上还是用交叠法，即嵌入 2 槽，退空 1 槽，后再嵌放 2 槽，吊边数为 4，嵌放顺序见表 4-17。同相的极相组之间仍为“首—首”或“尾—尾”相串联。

表 4-17　交叠法嵌放 2 极 18 槽单双层绕组顺序

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	下层	2	1	17	16	14		13		11		10	
	上层						2		3		17		18
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	下层	8		7		5		4					
	上层		14		15		11		12	12	6	8	9

第四节　双速三相异步电动机定子绕组简介

双速异步电动机是单绕组多速电动机中最基本，应用最广泛的一种。它分倍极比双速电动机和非倍极比双速电动机。本节着重用反向法来排列和调制以上两种双速电动机的定子绕组。

一、反向法调制倍极比双速电动机的绕组

倍极比双速电动机的两种磁极对数是呈倍数关系，例如：2/4 极、4/8 极等。此类双速电动机的定子绕组用反向法进行调制最方便。具体调制步骤方法如下：

1）选基准极。通常选少数极为基准极，采用显极接法。这样少数极的绕组每相在一个极下所占的槽数应为 $q=\frac{Q}{2pm}$，按电角度计，每相在一个极下则占 $\frac{180°}{m}=\frac{180°}{3}=60°$ 电角度，俗称 60°相带。当将这种绕组改为庶极接法后，即可获得倍数极（多数极），多数极为 120°相带。

2）分别画出基准极和多数极的槽矢量星形图，并在图上标出槽号。

3）按照反向法的原则来标出各槽的相号。即先标基准极的相号，后面标注多数极各槽相号时必须和基准极的相号一样。

4）选定三个相矢量方向，据此确定各槽相号的正负。取定相矢量方向时，必须要使三个相矢量对称，再就是由此决定的每相各槽的正负号尽可能按组连号，以便绕制线圈并易于嵌放。各槽相号的正负号可根据它与所选定的本相矢量交角的大小来决定，交角小于 90°的为正；交角大于 90°的为负。

5）检查各极下三相是否对称，如不对称应重新考虑排列方案。

6）列出两种极下全部绕组的排列表。

7）计算绕组系数，以分析排列后的绕组性能优劣。

在槽矢量星形图上求分布系数 K_d，方法是，将一相所属全部槽矢量加起来得出其矢量和，然后将矢量和除以本相槽矢量的算术和（单个矢量值 × 矢量数），即得出分布系数 K_d。即

$$K_d=\frac{\text{一相所属全部槽矢量的矢量和}}{\text{一相所属全部槽矢量的算术和}}$$

短距系数：$K_y=\cos\frac{\gamma}{2}$ 或 $K_y=\sin\left(\frac{y}{\tau}\cdot 90°\right)$

式中，γ 为一个线圈的节距较之整距所短（或所长）的电角度。

节距的确定：为照顾多数极的出力，倍极比双速电动机绕组节距常取接近或等于多极数的整距。

这样，$K_W=K_d\cdot K_y$

【例 4-13】 用反向法排列 $Q=36$ 槽、4/8 极单绕组双速电动机的绕组排列方案。

解： 1）选 4 极作为基准极，绘出 4 极槽矢量星形图并标出相号，如图 4-29 所示。

其中每槽电角度：

$$\alpha_4=\frac{2p\times180°}{Q}=\frac{4\times180°}{36}=20°$$

2）画出 8 极时的槽矢量星形图在各矢量上标出槽号。每槽电角度：

$$\alpha_4 = \frac{2p \times 180°}{Q} = \frac{8 \times 180°}{36} = 40°$$

对照 4 极时各槽矢量的相号在 8 极槽矢量图上标出相号。如图 4-30 所示。

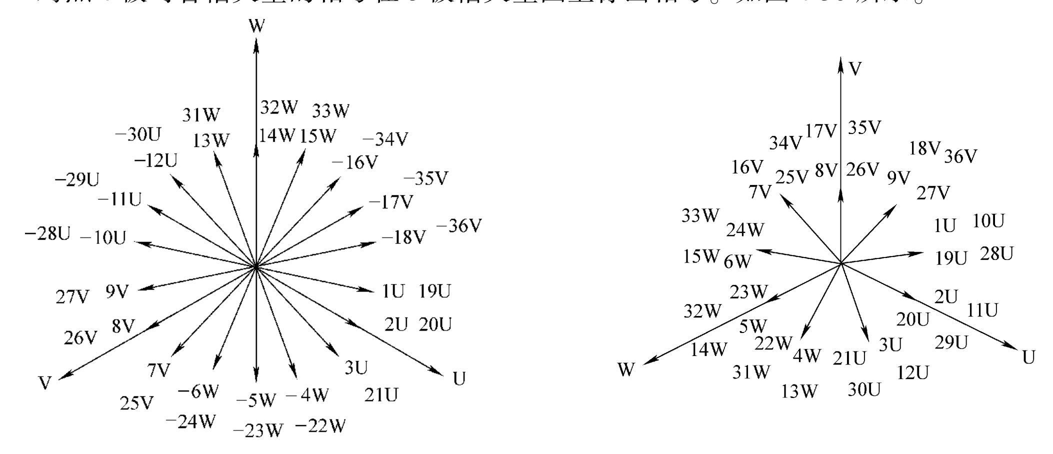


图 4-29　4 极 36 槽槽矢量星形图

图 4-30　8 极 36 槽槽矢量星形图

3）选定 8 极槽矢量星形图上的三个矢量方向。通过观察分析图 4-30，显然 U 相矢量应选在槽 2、11、20、29 方向；V 相矢量选在槽 8、17、26、35 方向；W 相矢量选择在槽 5、14、23、32 方向。由于各相所属全部槽矢量与相矢量之间的交角都小于 90°，故全部槽的相号都为正。

4）检查 4、8 极下的三相矢量都满足对称要求。而且，两种磁极数下的三相矢量相序相反（4 极时 U、V、W 为顺时针方向排列；8 极时 U、V、W 则为逆时针方向排列）表明这种排列为“反转向方案”。若使用场合要求两种极数的转向相同，只要在 8 极控制线路中将三根电源线中的任意两根同时对调即可。

5）列出两种极数下全部绕组的排列表，见表 4-18。表中的 * 号表示该槽导线（或线圈）在变极时电流反向。从表 4-18 中可清楚看出，无论三相中的哪一相，变极时都有一半线圈电流反向。这和前面变极原理所述结论一致。

表 4-18　36 槽 4/8 极双速电动机绕组排列表

槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4 极	U	U	U	−W	−W	−W	V	V	V	−U	−U	−U	W	W	W	−V	−V	−V
8 极	U	U	U	W	W	W	V	V	V	U	U	U	W	W	W	V	V	V
反向指示				*	*	*				*	*	*				*	*	*
极相组号	一			二			三			四			五			六		
槽号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4 极	U	U	U	−W	−W	−W	V	V	V	−U	−U	−U	W	W	W	−V	−V	−V
8 极	U	U	U	W	W	W	V	V	V	U	U	U	W	W	W	V	V	V
反向指示				*	*	*				*	*	*				*	*	*
极相组号	七			八			九			十			十一			十二		

6）绕组的嵌绕和接线对多速电动机大多按双层叠绕组嵌放。对本例，按多数极 8 极选取线圈节距：

$$y=\frac{Q}{2p}=\pm\varepsilon=\frac{36}{8}+\frac{4}{8}=5(\text{长距})$$

从表 4-15 中可看到，每三个槽号为同相且方向一致，取三个线圈连绕为一个极相组，全台共 12 个极相组。其匝数节距（$y=1—6$）完全相同。根据电动机的使用场合可选 2 Y/Y（恒功率）或 2 Y/△（恒转矩）接线方法，均能满足表 4-2 中的要求。本例取 2 Y/Y 和 2 Y/△两种接线，其绕组展开图（简便画法）如图 4-31 所示。其圆形简化接线图如图 4-32 所示。

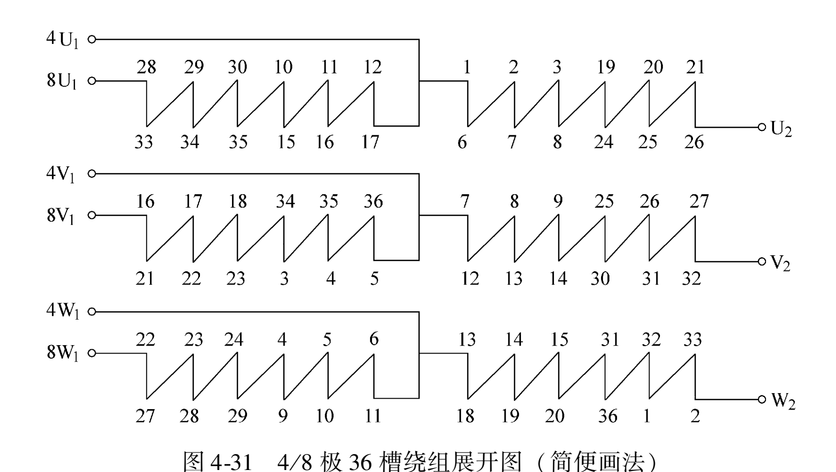


图 4-31　4/8 极 36 槽绕组展开图（简便画法）

7）计算绕组系数。本例中，4 极和 8 极一相（U 相）所有槽矢量如图 4-33 所示。为简单计，规定每根槽矢量数值为 1，它们共有三个方向，每个方向槽矢量值为 4，一相共有 12 个槽矢量。

这样，4 极时的分布系数：

$$K_{d4}=\frac{4\times\cos20^\circ+4\times\cos0^\circ+4\times\cos20^\circ}{12}=0.96$$

8 极时的分布系数：

$$K_{d4}=\frac{4\times\cos40^\circ+4\times\cos0^\circ+4\times\cos40^\circ}{12}=0.844$$

因 $y=5$，4 极时，较其极距（$\tau=9$）短 4 槽，相当 $20^\circ\times4=80^\circ$。8 极时，较其极距（$\tau=4.5$）长 0.5 槽，相当于 $40^\circ\times0.5=20^\circ$，所以

$$K_{y4}=\cos\frac{80^\circ}{2}=0.766$$

$$K_{y8}=\cos\frac{20^\circ}{2}=0.985$$

绕组系数：

4 极时，$K_{W4}=K_{d4}\cdot K_{y4}=0.96\times0.766=0.735$

8 极时，$K_{W8}=K_{d8}\cdot K_{y8}=0.844\times0.985=0.831$

图 4-32　4/8 极 36 槽绕组圆形简化接线图

a）简化接线图　b）2 丫/丫联结法　c）2 丫/△联结法

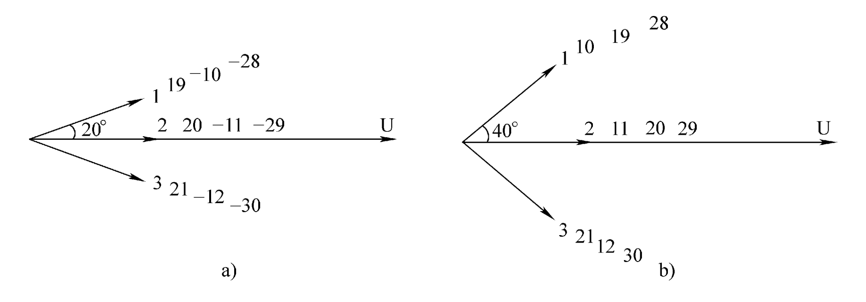


图 4-33　U 相所有槽矢量图

两种磁极数下绕组系数如果越接近，电动机在两种转速下运行时出力越接近。所以选择节距及分布情况时，一定要兼顾到这些。

二、反向法调制非倍极比双速电动机的绕组

前面对倍极比双速电动机绕组用的反向法基本上是正规分布绕组。所谓正规分布绕组是指相矢量分布是有规则的（每个方向上矢量的槽数相等，各矢量之间夹角相等）。在非倍极比双速电动机绕组中，既用到正规分布绕组，也常用到非正规分布绕组。下面举例说明非倍极比双速电动机绕组的排列方法。

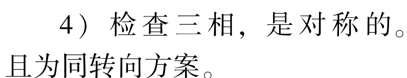
1. 正规分布绕组

【例 4-14】 一台定子 36 槽电动机，利用反向法排出 4/6 极正规分布双速单绕组。

解： 1）选 4 极绕组为基准极并画出它的槽矢量星形图，并标出相号。如图 4-29 所示。

2）画出 6 极槽矢量星形图如图 4-34 所示$\left(\alpha_6 = \dfrac{6 \times 180°}{36} = 30°\right)$，标出槽号，并根据 4 极时各槽相号标出相号。

3）取定三个相矢量，如图 4-34 中所示。据此标出各相号的正负。在这个槽矢量星形图上取定相矢量方向时，无法做到各相槽按组全部连号。图上所取相矢量方向中，B 相的 16、17、18 和 34、35、36 槽，C 相的 13、14、15 和 31、32、33 槽，其中都有一个槽和另两槽不同号——接法相反，所以绕制线圈时这三只不能连绕。



4）检查三相，是对称的。且为同转向方案。

5）列出绕组排列表见表 4-19。

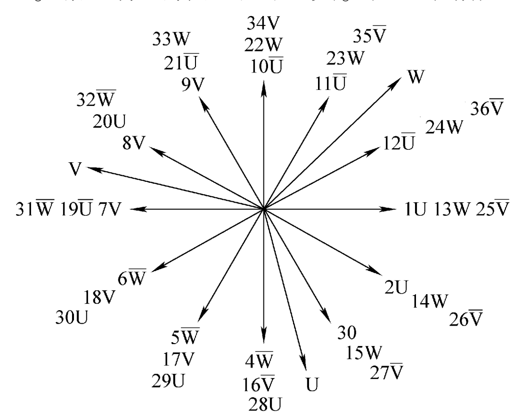


图 4-34　36 槽 6 极槽矢量星形图

表 4-19　4/6 极双速电动机绕组排列表

槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4 极	U	U	U	－W	－W	－W	V	V	V	－U	－U	－U	W	W	W	－V	－V	－V
6 级	U	U	U	－W	－W	－W	V	V	V	－U	－U	－U	W	W	－W	－V	V	V
反向指示															*		*	*
极相组号	一			二			三			四			五		六	七	八	
槽号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4 极	U	U	U	－W	－W	－W	V	V	V	－U	－U	－U	W	W	W	－V	－V	－V
6 极	－U	－U	－U	W	W	W	－V	－V	－V	U	U	U	－W	－W	W	V	－V	－V
反向指示	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		
极相组号	九			十			十一			十二			十三		十四	十五	十六	

6）绕组的嵌绕和接线。取线圈节距 $y = \tau_6 = \dfrac{36}{6} = 6$，双层叠绕组。从排列上看出共绕十

六组线圈组，其中3个线圈为一组者共8组；2个线圈一组者共4组；1个线圈为一组者共4组。每个线圈的匝数、节距完全相同。

绕组联接方式：采用2Y/△联结法，用于恒功率场合；采用2Y/Y联结法用于要求4极出力提高的场合，引出线为6根。

2Y/Y联结法的接线如图4-35b所示，2Y/△联结法的接线如图4-35c所示。

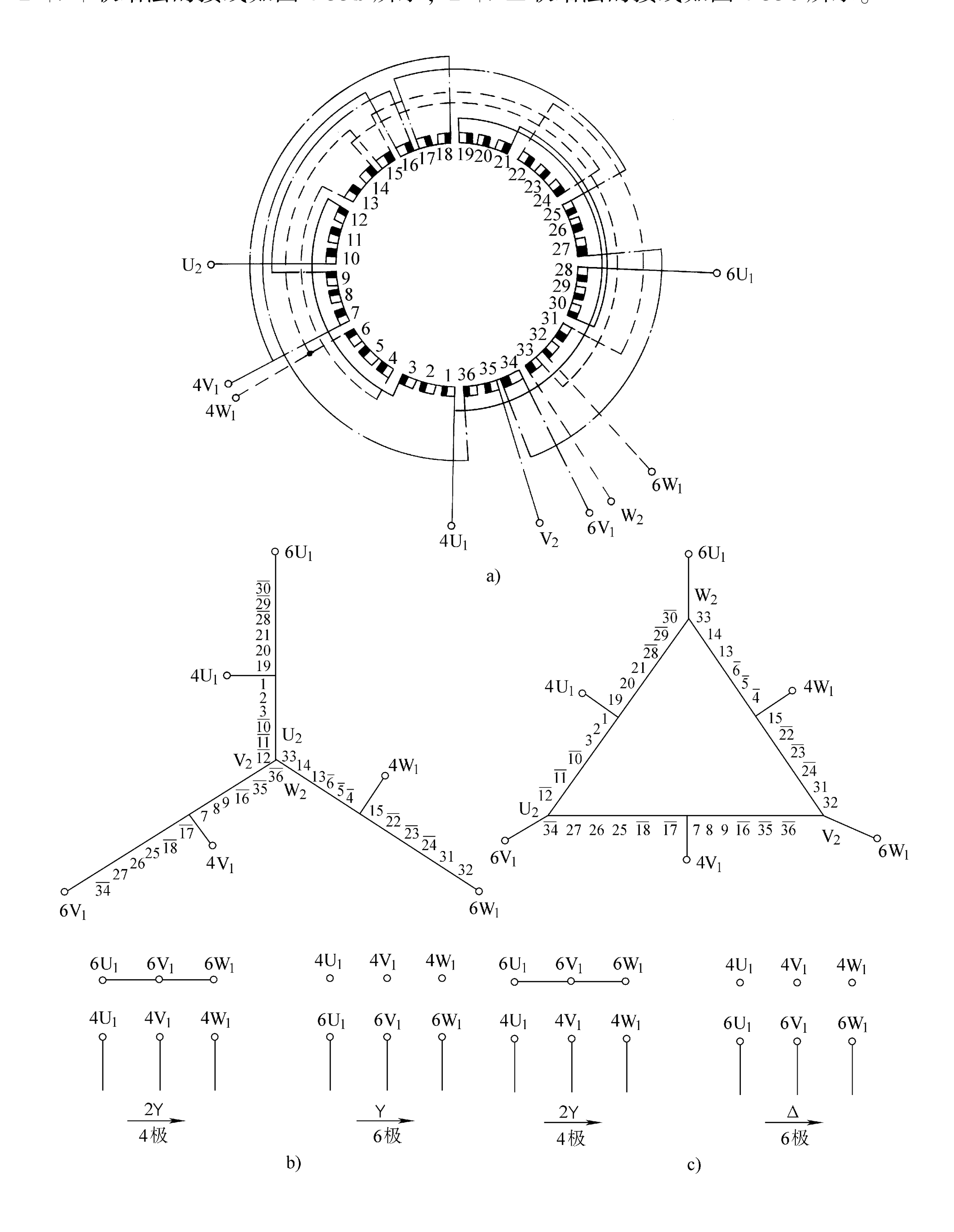


图4-35　绕组的嵌放和接线

a）圆形简化接线图　b）2Y/Y联结　c）2Y/△联结

7）绕组系数计算，分布系数：

4 极时，$K_{d4}=0.96$（前例已算过）

6 极时，$K_{d6}=\dfrac{4\times\cos75^\circ+4\times\cos45^\circ+4\times\cos15^\circ}{12}=0.644$（见图 4-34）

短距系数：$y=6$，4 极时，短 3 槽，相当于 60°电角度；6 极时为整距，所以

$$K_{y4}=\cos30^\circ=0.866,K_{y6}=1$$

绕组系数：

$$K_{W4}=0.96\times0.866=0.831$$

$$K_{W6}=0.644\times1=0.644$$

看出此种绕组在 6 极时绕组系数较低，只能适用低速出力要求不高的场合。

2. 非正规分布绕组

【例 4-15】 是用反向法排出了 4/6 极正规分布双速电动机绕组。虽然存有一定优点，但缺点主要是 6 极绕组分布系数低，引起的绕组系数低。这使 6 极状态运行时电动机的空载电流大，迫使绕组必须增加匝数，减小线径，结果导致在两种磁极数下的电动机出力都降低。在这种情况下，为使电动机出力大些，可采用非正规分布绕组。

非正规分布绕组，就是每相矢量分布不正规的绕组（各电动势矢量方向所含槽数不等或夹角不等）。对上例来说，采用这种绕组的主要目的是提高 6 极时的分布系数。当然不可避免地会降低另一磁极数（4 极）的分布系数，但结果使两种磁极数时的出力比较接近，弥补了前面排列的不足。

下面仍以 4/6、36 槽电动机为例，说明非正规绕组的排列方法。

从正规绕组 6 极时一相分布情况看（见图 4-34），它共有 6 个矢量，每个矢量含 2 槽，矢量分布可写为 2、2、2、2、2、2，共 12 个槽。比较分散，所以分布系数低。现在将其改为 2、4、4、2 的不正规分布如图 4-36 所示。要满足这种分布，又要使变极时各槽相号不能变，那么 4 极也必须同时重新调制，取其矢量分布为 2、2、2、2、2、2（原来为 4、4、4），如图 4-37 所示，也是对称的。

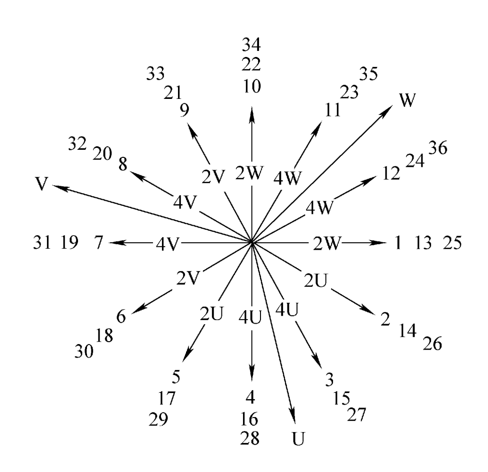


图 4-36　6 极 36 槽非正规分布槽矢量星形图

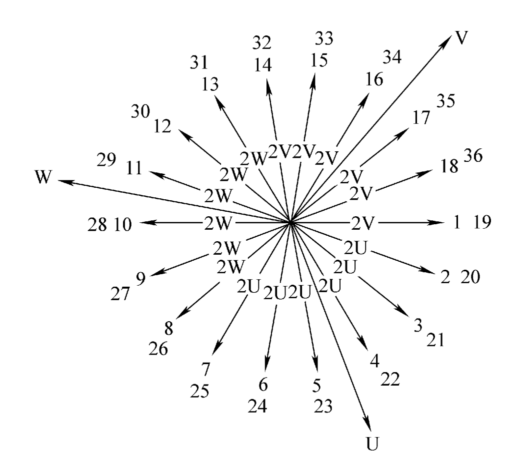


图 4-37　4 极 36 槽非正规分布槽矢量星形图

由此得出绕组排列表，见表 4-20。

表 4-20　4/6 极 36 槽非正规绕组排列表

槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4 极	V	U	U	U	U	－V	－V	－V	－V	W	W	W	W	V	－U	－U	－W	－W
6 极	－V	U	U	U	U	V	V	V	V	W	W	W	W	－V	U	U	－W	－W
反向指示	*					*	*	*	*					*	*	*		
线圈组	一	二				三				四				五	六		七	
槽号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4 极	V	U	U	U	U	－V	－V	－V	－V	W	W	W	W	V	－U	－U	－W	－W
6 极	V	－U	－U	－U	－U	－V	－V	－V	－V	－W	－W	－W	－W	V	－U	－U	W	W
反向指示		*	*	*	*					*	*	*	*				*	*
线圈组	八	九				十				十一				十二	十三		十四	

取 $y=6$（6 极全节距）双层叠绕组，从排列表上可得到共绕十四个线圈组，其中，四个线圈为一组者共 6 组；两个线圈为一组者共 4 组；一个线圈为一组者共 4 组。采用 2 Y/△联结法，其接线后引出 6 根出线，且为反转向方案。其接线图如图 4-38 所示。

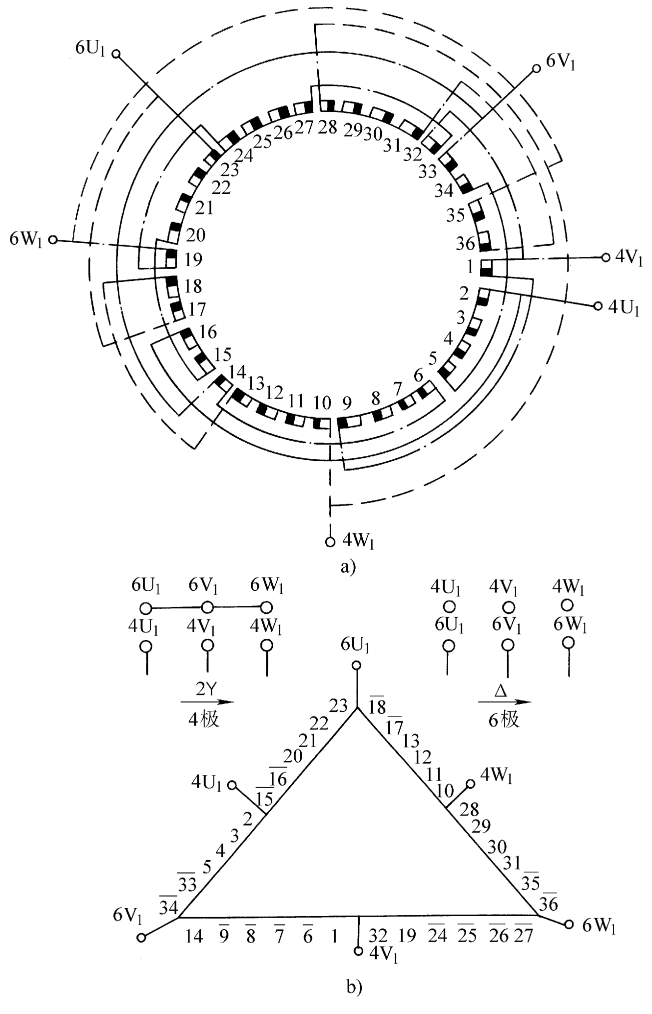


图 4-38　4/6 极 36 槽非正规分布绕组接线图

a）圆形简化接线图　b）接线原理图

这种绕组的绕组系数计算如下：

分布系数：4 极时，$K_{d4}=\dfrac{4\times\cos50^\circ+4\times\cos30^\circ+4\times\cos10^\circ}{12}=0.83$

6 极时，$K_{d6}=\dfrac{4\times\cos45^\circ+8\times\cos15^\circ}{12}=0.88$

因 $y=6$，4 极时，$K_{y4}=\cos30^\circ=0.866$

所以，短距系数：$K_{y6}=1$

绕组系数：$K_{W4}=0.83\times0.866=0.72$

$K_{W6}=0.88\times1=0.88$

与前例相比，6 极时的绕组系数大为提高，而 4 极时相应降低，从而使两种转速下功率相近，适用于两种转速功率要求均高的场合。

第五节　三相异步电动机的转子绕组及嵌放

三相异步电动机的转子绕组有两种形式，笼型绕组和绕线式绕组。

一、笼型绕组

转子的每个槽中只有一根导体（铜或铝条），由两端的端环将各槽导体短接成闭合回路，形如鼠笼，故称笼型绕组，图 4-39 所示。

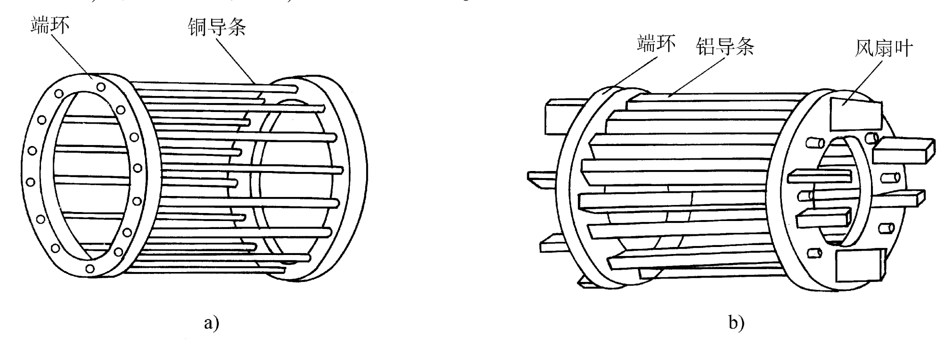


图 4-39　笼型绕组

现在，中、小型电动机的笼型绕组大多采用浇铸铝水工艺，铸在转子铁心槽内，和两端环成为一体，又称铸铝转子绕组。

笼型绕组结构简单，经久耐用，且形成的磁极数自动的和定子磁极数相同，所以得到广泛采用。

对笼型绕组主要有以下几点要求：

1）转子槽数和定子槽数及电动机的磁极数之间必须有一定的配合关系。配合不好，会出现由谐波造成的振动、噪声及起动性能不良等现象，严重时电动机甚至不能起动。表 4-21 是笼型异步电动机定、转子槽数配合的推荐值。

2）铸出的笼型绕组不能有气孔缺陷和断条。

3）制成的笼型绕组导条和端环质量密度一定要紧密和均匀。且在动态时（高速旋转状态下）保持机械平衡。

二、绕线式绕组

和笼型异步电动机比较，绕线转子电动机虽然结构复杂，但大大改善了电动机的起动性能和调速性能，所以它在较大功率的电动机和要求起动性能高的电动机中应用较多。

绕线式转子绕组是将电磁（圆或扁形）线绕制成线圈后，按一定规律嵌放在转子槽内，出线端接在三个集电环上，经过电刷和集电环的接触引出。绕组经绑扎和浸漆处理后固定在转子铁心内。如图 4-40 所示。

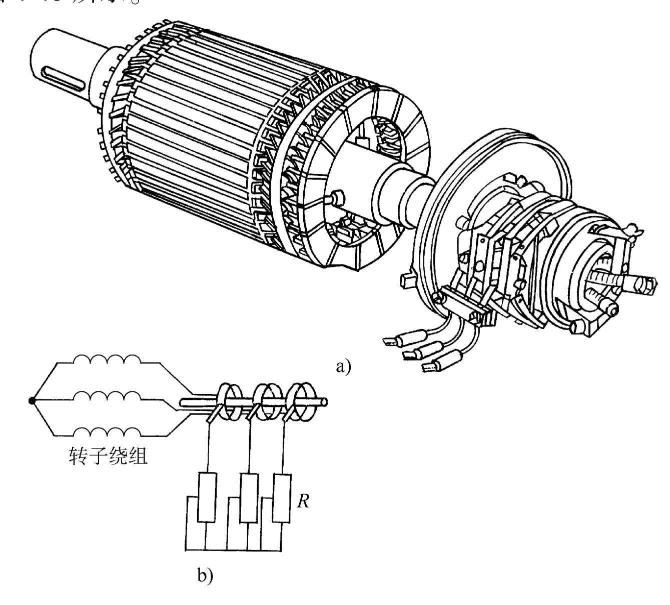


图 4-40 绕线式转子结构

表 4-21 笼型异步电动机定子、转子槽数配合的推荐值

磁极数	定子槽数	直槽转子槽数	斜槽转子槽数
2	18	—	16,26
	24	[16],32	(18),20,(30),(31),33,34,35
	30	22,38	(18),20,21,23,(24),37,39,40
	36	26,28,44,46	25,27,29,43,45,47
	42	32,34,50,52	—
	48	38,40,56,58	37,39,41,55,57,59
4	24	[32]	16,[20],22,30,33,34,35,36
	36	26,(44),46	(24),27,(28),(30),[32],45,48
	42	(34),(50),52,54	(33),34,[38],(51),53
	48	34,38,56,58,62,64	(36),(39),40,[44],57,59
	60	50,52,68,70,74	48,49,51,56,64,69,71
	72	62,64,80,86	61,63,68,76,81,83
6	36	26,42,[48]	33,47,49,50
	54	44,64,66,68	42,43,65,67
	72	56,58,62,82,84,86,88	57,59,60,61,83,85,87
	90	74,76,78,80,100,102,104	75,77,79,101,103,105

（续）

磁极数	定子槽数	直槽转子槽数	斜槽转子槽数
8	48	34,62,[64]	35,44,46,61,63,65
	54	—	58,62
	72	58,86,88,90	56,57,59,85,87,89
	84	66,(68),70,98,100,102,104	(68),(69),(71),(97),(99),101
	96	78,82,110,112,114	79,80,81,83,109,111,113

注：带小括号者为非优配合，带中括号者为慎用。

绕组在转子铁心槽内的嵌放主要有以下要求：

1）和三相定子绕组相似，转子上嵌放的三相绕组也要求对称（绕组大小、形状、匝数等三相完全一样，在空间圆周上互差120°电度角）。

2）三相转子绕组形成的磁极数必须和配套的定子磁极数相同。

3）三相绕组在转子圆周上力求分布均匀，满足机械上的动平衡，对转速较高的电动机，这方面要求更严格。

4）三相绕组不仅要满足电磁对称平衡（互差120°电度角）的要求，它们的首端（或尾端）的位置也要尽可能均匀分布于转子圆周上（满足机械对称平衡）。

绕线式转子绕组形式可分为两类。小型三相异步电动机转子绕组常用双层叠式或单层链式，个别采用同心式。绕组的排列、绕制和嵌放方法与同一形式的定子绕组相似。容量较大的三相绕线转子异步电动机转子绕组一般采用波形绕组。转子绕组通常接成Y形，三个端点分别接至三个集电环上。

1. 转子单层链式绕组结构

这种绕组形式的突出优点是：在转子圆周排列均匀，动平衡较好。绕组的嵌放排列和同一形式的定子绕组相同。主要区别在于出线端（各相首尾端）位置在圆周上力求互差120°机械角度，便于和集电环相连，且保持机械上平衡。

【例4-16】　$Q=36$　$2p=6$ 的小型电动机转子，采用单层链式绕组。其绕组展开图如图4-41所示，端视图如图4-42所示。

嵌绕工艺要点：

1）取线圈节距 $y=5(1—6)$，绕制18个相同的极相组，每个极相组含一个线圈。

2）采用交叠法，嵌放1槽，退空1槽，再嵌1槽，吊2个边。嵌放顺序见表4-22，或者先嵌完底边再嵌放浮边。

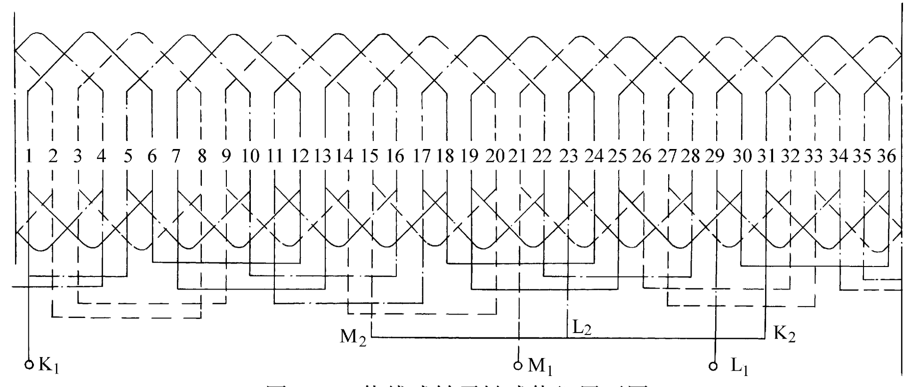


图4-41　绕线式转子链式绕组展开图

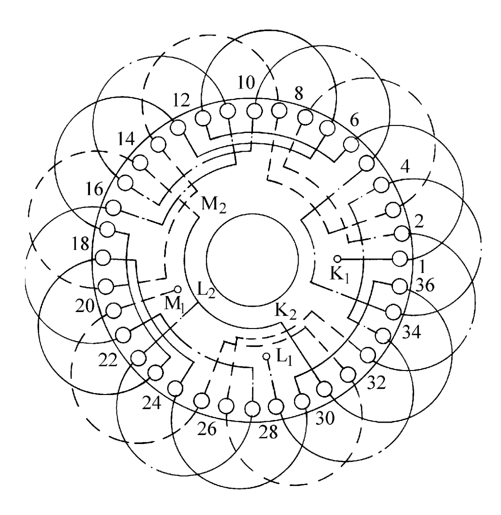


图 4-42　转子链式绕组端视图

表 4-22　交叠法 6 极 36 槽单层链式转子绕组嵌放顺序

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	底边	6	8	10		12		14		16		18		20		22		24	
	浮边				5		7		9		11		13		15		17		19
嵌放顺序		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
槽号	26		28		30		32		34		36		2		4				
		21		23		25		27		29		31		33		35	1	3	19

3）取出线端，若 K_1 从第 1 槽出，L_1 将从 29 槽出，M_1 将从 21 槽出，各相极相组仍为“首—首”，“尾—尾” 相串联。

2. 转子波形绕组

波形绕组是将同一相的线圈在转子槽的嵌放连接后，从外形上看好像波浪一样，故而得名。波形绕组应用最广泛的是每个槽里有两根铜条（矩形电磁线）的单匝双层形式。如图 4-43 所示。

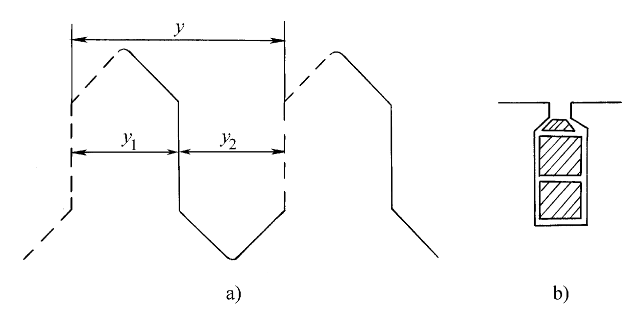


图 4-43　波形绕组

a）波绕组排列情况　b）单匝双层形式

双层波形绕组的排列特点是：

1）每相两个回路，且两回路的绕向相反，两回路采用串联连接。早期生产的老式电动机是在底层铜条上用导线将两回路连接起来，且三相绕组的六个出线头是放在转子的同一个端部，位置较挤，称甲类波形绕组。乙类波形绕组是改进后的接线方法，是通过某个槽内的

单根铜条（该槽只放一根铜条）将两个回路连接起来，这样使三相绕组的三个首端和三个尾端分别位于转子的两端，且每相的首、尾端在同一个槽内。

绕组回路沿转子圆周绕行的周数见表4-23。

2）绕组的节距。波形绕组的正常节距有 y_1、y_2 及合成节距 $y = y_1 + y_2$，图4-39所示。除此外，每一回路当绕行一周过渡到下周时，绕组节距必须少一槽，这个节距称过渡短节距 y_1'。波形绕组的节距见表4-24。

表4-23　绕组沿转子圆周绕行的周数

每极每相槽数	$q=$整数	$q=$带$\frac{1}{2}$的分数	
第一回路绕行周数	q	$q_1 = q + \frac{1}{2}$	$q_1 = q - \frac{1}{2}$
第二回路绕行周数	q	$q_2 = q - \frac{1}{2}$	$q_2 = q + \frac{1}{2}$
每一相绕组总绕行周数	$2q$	$2q$	

表4-24　转子波形绕组的节距

极矩	$\tau=$整数	$\tau=$带$\frac{1}{2}$的分数
正常节距	$y_1=\tau$（槽）	$y_1 = \tau + \frac{1}{2}$（槽） $y_2 = \tau - \frac{1}{2}$（槽）
过渡节距	$y_1' = y_1 - 1$（槽）	$y_1' = y_1 - 1$（槽） $y_2' = y_2 - 1$（槽）

3）三相首端和尾端的位置。三相波形绕组首尾端的位置，既要使三相绕组在空间互差120°（电磁对称平衡），又要尽可能均匀的分布于转子圆周上（机械平衡），除 $\frac{2p}{3}=$ 整数（例如6极和12极等）的电动机以外，其余电动机转子上均可获得电磁和机械上的对称平衡。转子三相波形绕组的首尾端见表4-25。

【例4-17】　三相4极转子36槽波形绕组的排列。

甲类绕组排列：

每极每相槽数：

$$q = \frac{Q}{2pm} = \frac{36}{4 \times 3} = 3\ \text{槽}$$

每相沿转子圆周绕行周数：$2q = 6$，第一、第二回路各绕行了3周。

表4-25　转子波绕组首尾端位置（槽号）

极数		2极,8极	4极,10极	6极,12极
始端	K_1	1	1	1
	L_1	$1 + \frac{1}{3}Z$	$1 + \frac{2}{3}Z$	$1 + \frac{1}{3}Z + 2q$
	M_1	$1 + \frac{2}{3}Z$	$1 + \frac{1}{3}Z$	$1 + \frac{2}{3}Z - 2q$

（续）

极数		2 极,8 极	4 极,10 极	6 极,12 极
尾端	K_2	甲类(老式接法):尾端槽号 = 首端槽号 + 正常节距 乙类:尾端和首端同槽		
	L_2			
	M_2			

注：表中 Q 为转子槽数；q 为转子每极每相槽数。

正常节距：$y_1=\tau=\dfrac{Q}{2p}=\dfrac{36}{4}=9$ 槽

过渡节距：$y_1'=y_1-1=9-1=8$ 槽

首端位置（槽号），由表 4-24 查得，若：

$K_1=1$，则

$$L_1=1+\frac{2}{3}Q=1+\frac{2}{3}\times36=25$$

$$M_1=1+\frac{1}{3}Q=1+\frac{1}{3}\times36=13$$

尾端位置（槽号）：

$K_2=K_1+y_1=1+9=10$

$L_2=L_1+y_1=25+9=34$

$M_2=M_1+y_1=13+9=22$

排列表见表 4-26

表 4-26　三相 4 极 36 槽甲类波绕组排列表

绕行周次	第一周				第二周				第三周				边层
K_1	1	10	19	28	36	9	18	27	35	8	17	26	上/下
K_2	10	19	28	1	9	18	27	36	8	17	26	35	上/下
L_1	25	34	7	16	24	33	6	15	23	32	5	14	上/下
L_2	13	7	31	25	12	6	30	24	11	5	29	23	上/下
M_1	13	22	31	4	12	21	30	3	11	20	29	2	上/下
M_2	22	31	4	13	21	30	3	12	20	29	2	11	上/下
节距	9	9	9	8	9	9	9	8	9	9	9	—	

绕组展开图（一相）见图 4-44 及绕组端面布线接线图见图 4-45。图 4-46 所示为绕组嵌放时的摆置图。

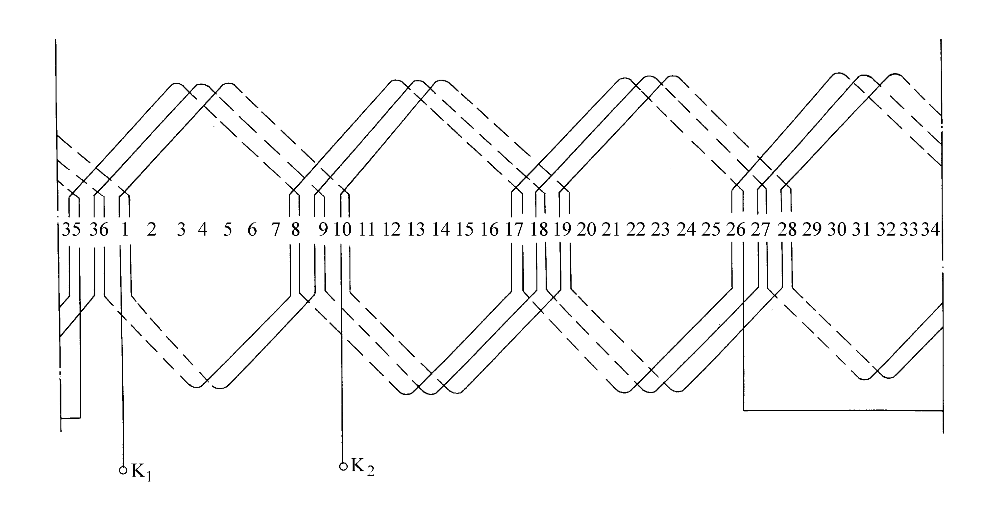


图 4-44　三相 36 槽 4 极波绕组一相展开图（甲类）

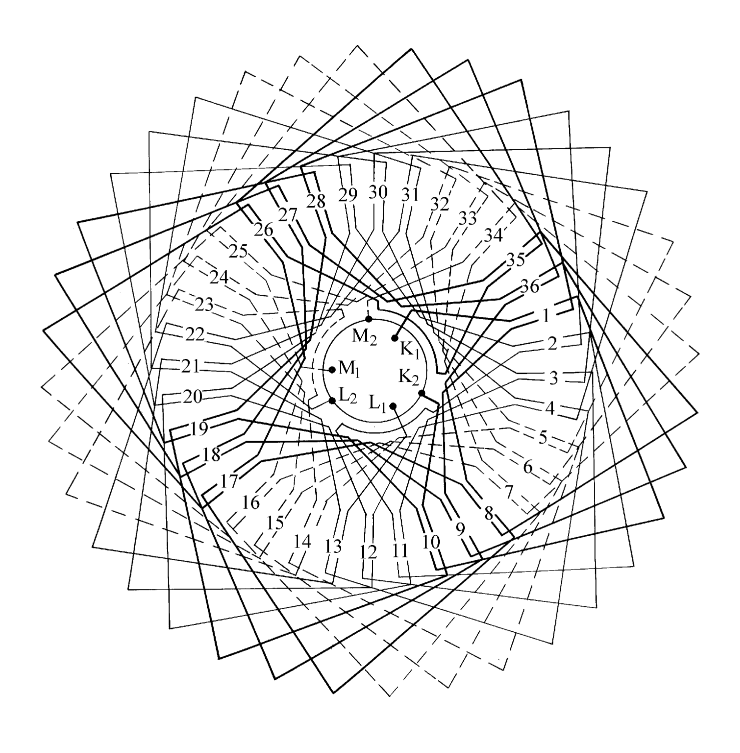


图 4-45　三相 4 极 36 槽甲类波绕组端面布线接线图

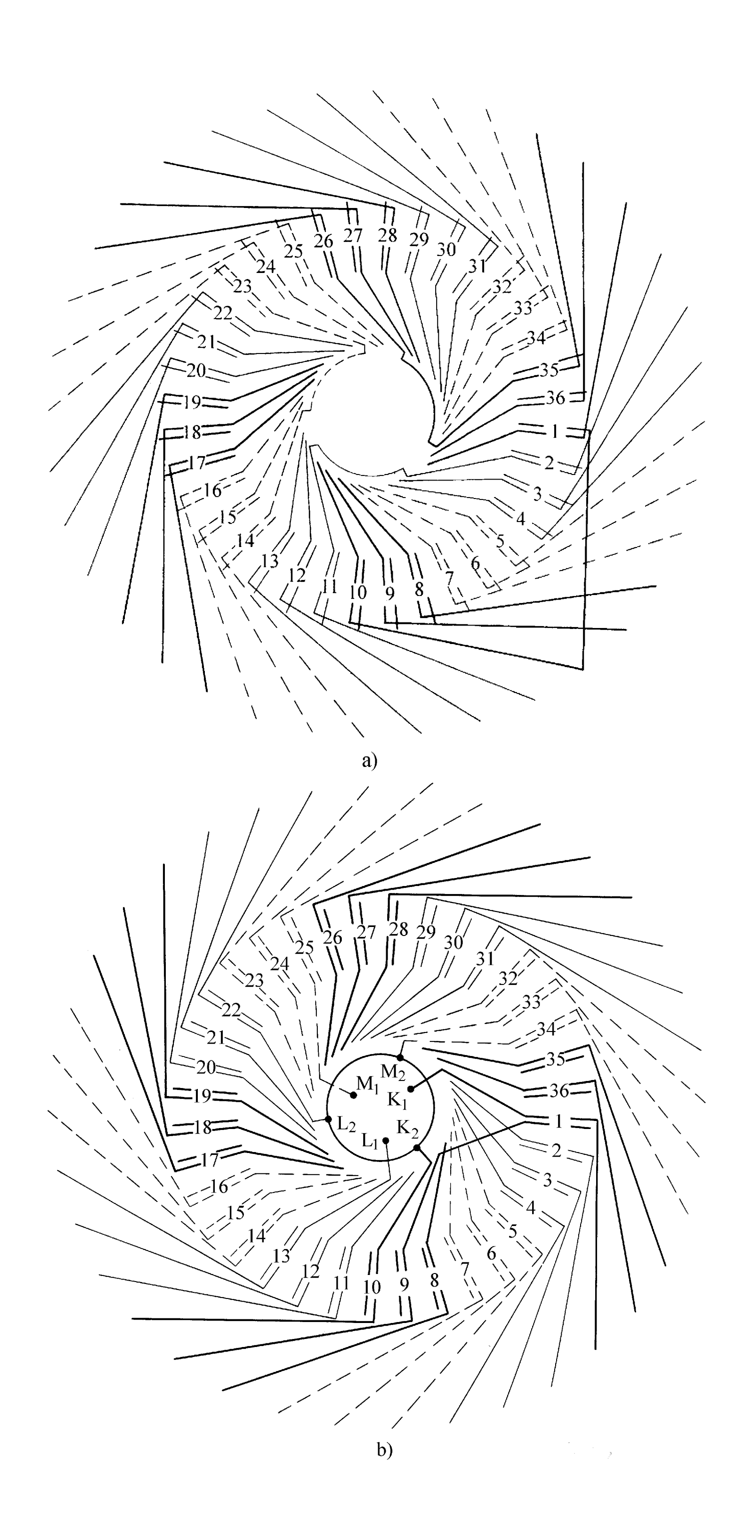


图 4-46　绕组嵌放摆置图

a）上层摆置图　b）下层摆置图

乙类绕组排列：

每极每相槽数：

$$q=\frac{Q}{2pm}=\frac{36}{4\times 3}=3\text{ 槽}$$

每相沿转子圆周绕行周数：$2q=6$，第一、第二回路各绕行 3 周。

正常节距：$y_1=\tau=\frac{Q}{2p}=\frac{36}{4}=9$ 槽

过渡节距：$y_1'=y_1-1=9-1=8$ 槽

首端位置（槽号），根据表 4-25 查得，若：

$K_1=1$，则

$$L_1=1+\frac{2}{3}Q=1+\frac{2}{3}\times 36=25$$

$$M_1=1+\frac{1}{3}Q=1+\frac{1}{3}\times 36=13$$

尾端位置与首端在同一槽内。

排列表，见表 4-27

表 4-27　三相 4 极 36 槽乙类波形绕组排列表

绕行周次	第一周				第二周				第三周				边层
K_1	1		19		36		18		35		17		上
		10		28		9		27		8		26	下
		10		28		9		27		8		26	上
K_2	1		19		36		18		35		17		下
L_1	13		31		12		30		11		29		上
		22		4		21		3		20		2	下
		22		4		21		3		20		2	上
L_2	13		31		12		30		11		29		下
M_1	25		7		24		6		23		5		上
		34		16		33		15		32		14	下
		34		16		33		15		32		14	上
M_2	25		7		24		6		23		5		下
节距	9	9	9	8	9	9	9	8	9	9	9		

绕组展开图如图 4-47 所示（一相），绕组端视图如图 4-48 所示，图 4-49 所示为该绕组嵌放时的摆置图。

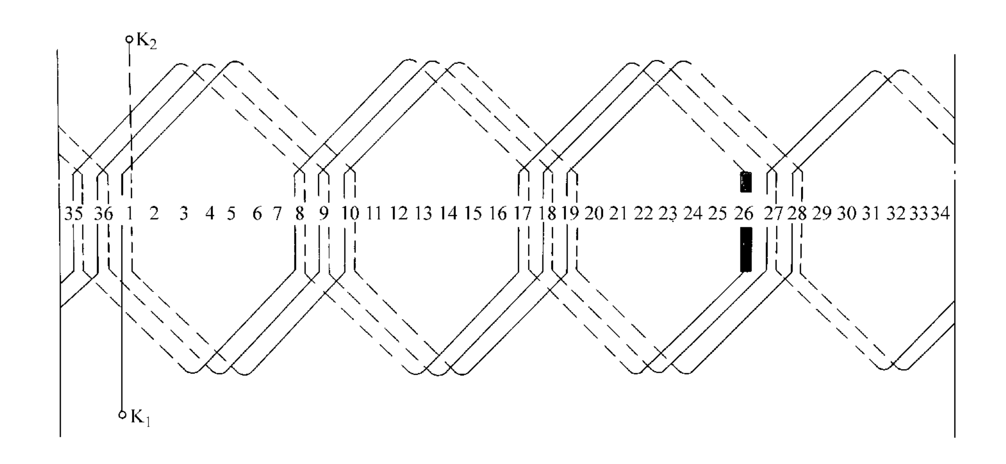


图 4-47　三相 4 极 36 槽乙类波绕组展开图（一相）

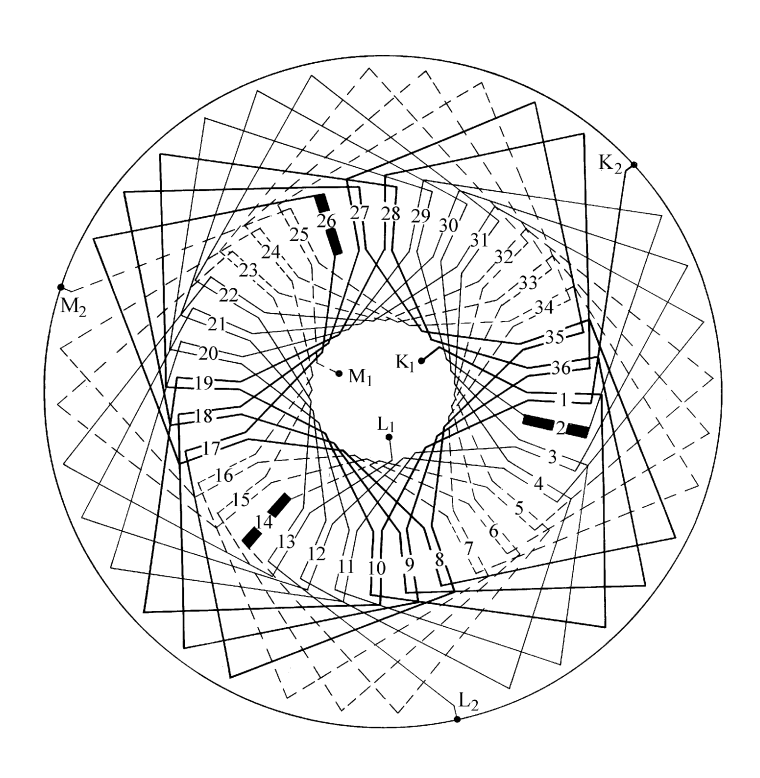


图 4-48　三相 4 极 36 槽乙类波绕组端视图

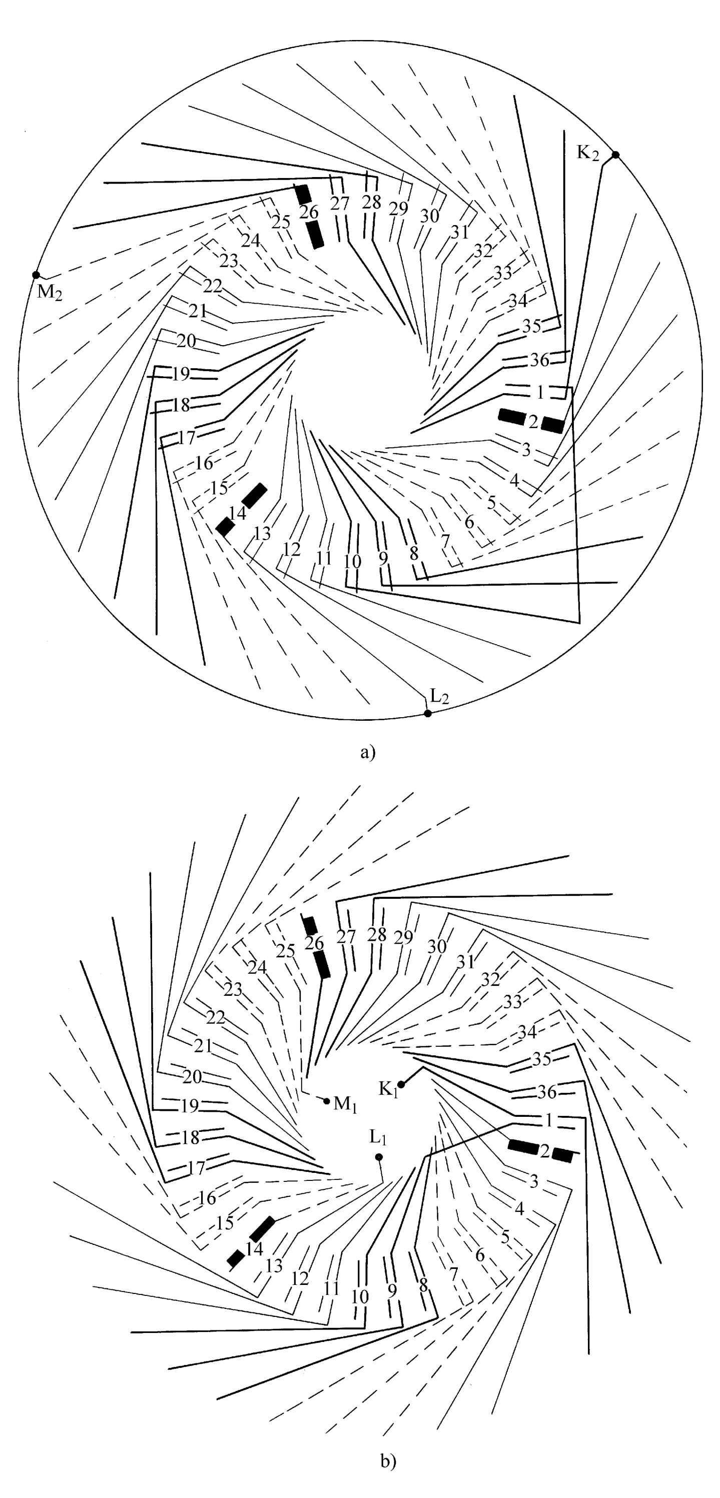


图 4-49　三相 4 极 36 槽乙类波绕组上、下层摆置图

a）上层摆置图　b）下层摆置图

第五章　三相异步电动机的改造和修复

在生产实际中，为了降低能耗、节约投资成本或者适应生产机械的工作需求等，要将原来使用的三相异步电动机进行技术改造；对由于不慎损坏的电动机，要进行修复，以利于正常生产的进行。本章搜集整理了一部分对三相异步电动机进行改造和修复的经验及计算方法，供读者参考。

第一节　三相异步电动机的改压改造

近年来，为提高供电质量、减少能耗、节约金属材料，很多工厂进行了升压改造，即将380V供电系统改为660V供电系统。为充分利用已有的380V电动机，需将其改为660V使用，这是一项节约能耗的重要技术措施。另外，电动机只有在额定电压下才能正常工作，但有时需要将其他额定电压的电动机在另一个额定电压下运行。所有这些，均需要将电动机进行改压改造。

改压改造有两种方法：一种是通过改接定子绕组中极相组或线圈之间的连接线，而不需要拆除绕组；另一种是拆掉原来绕组重绕。当然，对笼型或绕线转子三相异步电动机，改压时只需要改接定子绕组，不必改变转子绕组，但是改压时，必须要考虑电动机中绝缘材料的耐压。

一、改接极相组或线圈之间的连接线（不拆换绕组）

通过改接连接线而改变电压必须遵循一个原则，即电动机绕组中每一个线圈或极相组上所承受的电压不能改变，这样改压后的电动机电磁性能就保持不变。

【例5-1】　一台4极三相异步电动机原来采用380V下的△联结法。现将其改为Y联结，如图5-1所示。

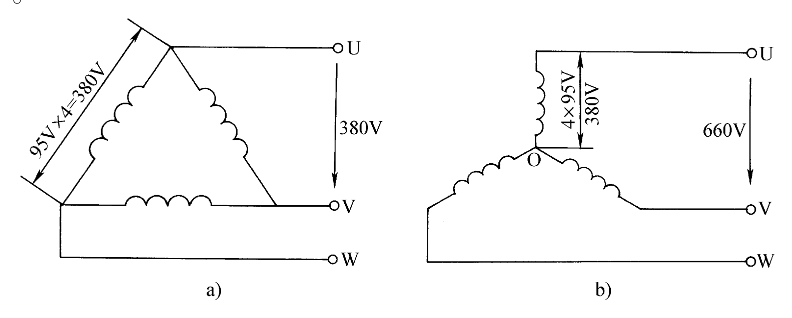


图5-1　改压前后每个极相组承受的电压不变

改接前，每相电压为380V，每极相组承受95V电压，改接后，若保持每极相组还承受95V电压，一相电压仍为380V，则Y联结时，电源电压应为$380V\times\sqrt{3}=660V$。即改接后，该电动机在660V电源下仍然正常工作，电磁性能不变。

根据以上例证，改压的具体方法如下：

1）计算改压前后的线电压比值的百分数 $u\%$

$$u\% = \frac{U'_e}{U_e} \times 100\% \tag{5-1}$$

式中　U'_e——改压后电动机的额定电压（线电压）（V）；

　　U_e——改压前电动机的额定电压（线电压）（V）。

根据上式计算出的 $u\%$，查表 5-1 就可以得到改压后的接线法。

以图 5-1 为例，$u\% = \frac{660}{380} \times 100\% = 173\%$ 查表 5-1，将原来一路△联结改为一路Y联结即可。

表 5-1　三相绕组改变接线后的电压比值（设电压 $U_e = 100V$）

绕组原联结方式	绕组改压后联结方式															
	1路Y联结	2路并联Y联结	3路并联Y联结	4路并联Y联结	5路并联Y联结	6路并联Y联结	8路并联Y联结	10路并联Y联结	1路△联结	2路并联△联结	3路并联△联结	4路并联△联结	5路并联△联结	6路并联△联结	8路并联△联结	10路并联△联结
1 路Y联结	100	50	33	25	20	17	12.5	10	58	29	19	15	12	10	7	6
2 路并联Y联结	200	100	67	50	40	33	25	20	116	58	39	29	23	19	15	11
3 路并联Y联结	300	150	100	75	60	50	38	30	173	87	58	43	35	29	22	17
4 路并联Y联结	400	200	133	100	80	67	50	40	232	116	77	58	46	39	29	23
5 路并联Y联结	500	250	167	125	100	83	63	50	289	144	96	72	58	48	36	29
6 路并联Y联结	600	300	200	150	120	100	75	60	346	173	115	87	69	58	43	35
8 路并联Y联结	800	400	267	200	160	133	100	80	460	232	152	120	95	79	58	46
10 路并联Y联结	1000	500	333	250	200	167	125	100	580	290	190	150	120	100	72	58
1 路△联结	173	86	58	43	35	29	22	17	100	50	33	25	20	17	12.5	10
2 路并联△联结	346	173	115	87	69	58	43	35	200	100	67	50	40	33	25	20
3 路并联△联结	519	259	173	130	104	87	65	52	300	150	100	75	60	50	33	30
4 路并联△联结	692	346	231	173	138	115	86	69	400	200	133	100	80	60	50	40
5 路并联△联结	865	433	288	216	173	144	118	86	500	250	167	125	100	80	63	50
6 路并联△联结	1038	519	346	260	208	173	130	104	600	300	200	150	120	100	75	60
8 路并联△联结	1384	688	464	344	280	232	173	138	800	400	267	200	160	133	100	80
10 路并联△联结	1731	860	580	430	350	290	216	173	1000	500	333	250	200	167	125	100

2）计算的比值 $u\%$ 有时不一定和表 5-1 查到的数值相同，只能查到相近的数值。这时，只要两者的值相差不超过 5%，即

$$\frac{u\%_{计算值} - u\%_{表中值}}{u\%_{表中值}} \times 100\% \leqslant \pm 5\% \tag{5-2}$$

若满足上式，仍可以采用表 5-1 中的改接法。

3）电动机绕组的并联支路数 a 与电动机的磁极数、槽数及原来绕组的形式有关，表 5-1 中查不到就不能改接。

4）因为电动机的绝缘是按改接前原额定电压设计的，所以将低压电动机改接成高压电动机时，应考虑到绝缘材料的耐压。而高压电动机改接成低压电动机时，则不用考虑这些。

5）除表 5-1 所列出的改接法外，还可改为延边三角形或 Z 形等特殊接法。

【例 5-2】 将一台 125kW、3000V，8 极三相异步电动机改在 380V 电源上使用，如何改接？

解： 查出此台电动机原来为一路Y联接，双层叠绕组。

计算：$u\% = \dfrac{U_e'}{U_e} \times 100\% = \dfrac{380}{3000} \times 100\% = 12.65\%$

查表 5-1，最接近的接法为 8 路并联Y联结，$u_{表中值} = 12.5\%$，五路并联△联结，$u_{表中值} = 12\%$。对 8 极双层叠绕组的并联支路数只能有 2、4、8 三种。所以选择改为 8 路并联，Y联结。

核对：

$$\frac{u\%_{计算值} - u\%_{表中值}}{u\%_{表中值}} \times 100\% = \frac{12.65 - 12.5}{12.5} \times 100\% = 1.6\% < 5\%$$

可以确定改接为 8 路并联Y联结。因由高压改为低压使用，所以电动机的绝缘不用考虑。

【例 5-3】 将一台 380V，6 极 2 路、Y联结电动机改为 660V 电源上使用。

解： 因为对 6 极Y联结电动机，每相有 6 个极相组，原来在 380V 电源下，每个极相组承受的电压为$\dfrac{380}{\sqrt{3}} \div 6 = 73.3\text{V}$。

可将每相的 2 个极相组接为△联结，每相的其余 4 个极相组分别串联接为Y联结，组成延边三角形，如图 5-2 所示。

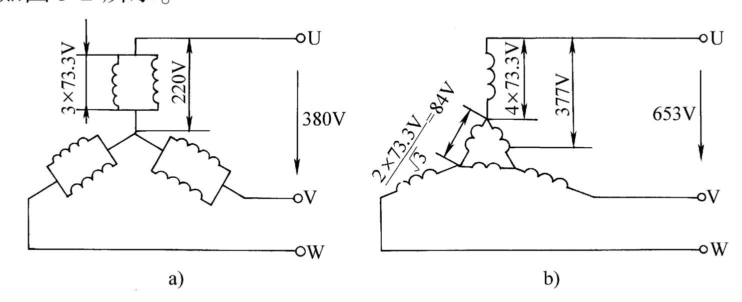


图 5-2　将 2 路Y联结改为延边三角形联结

这样，通过计算分析，每相电压为 377V，在 $377 \times \sqrt{3} = 653\text{V}$ 的电源上工作，若在 660V 电源上工作，稍有误差。

$\Delta u\% = \dfrac{660 - 653}{653} \times 100\% = 1\% < 5\%$。可以确定将此改接为延边三角形联结，在 660V 电源上工作。

【例 5-4】 将一台 380V、4 极 2 路、Y联结电动机改为在 660V 电源上使用。如何改接？

解： 按【例 5-3】改接为延边三角形也可以。如图 5-3 所示，不再多述。

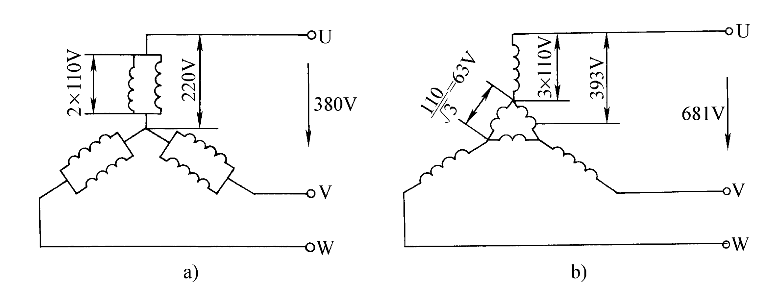


图 5-3　将 4 极 2 路Y联结改为延边三角△形联结

还可以改接为 Z 形联结。该接法打乱了原来极相组的连接顺序，使同一相的 4 个极相组中有两个极相组（如 U 的 U_1W_4 和 U_3W_2）的电压相差 120°，虽然每个极相组的电压仍为 110V，但相电压相量之和为 380V，线电压为 660V。如图 5-4 所示。

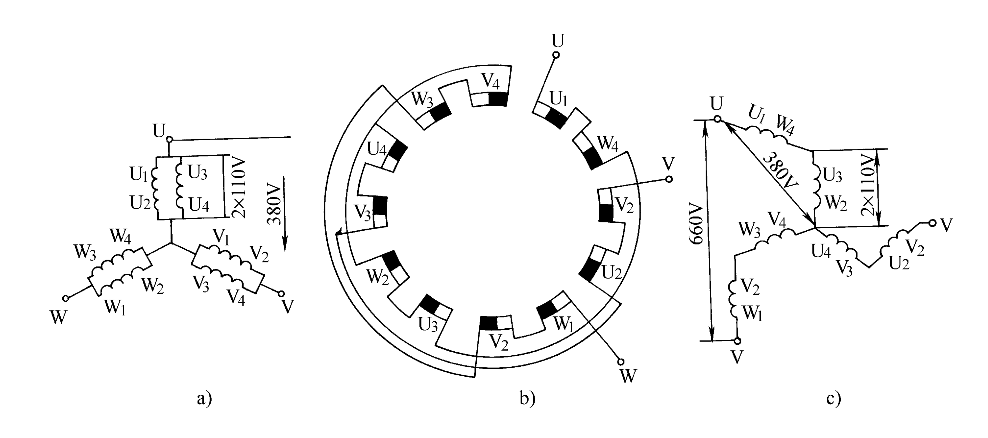


图 5-4　4 极 2 路Y联结改为 Z 形联结

改接成 Z 形接法后电动机的漏抗变化较大，其起动转矩为原来的 80% ~90% 。

改接时，若有几根并绕时，可视为并联支路等于并绕根数的多路接法，采取同相拆股的方法进行改接。

对 380V 改为 660V 运行的电动机典型改接方法，可参考表 5-2。

表 5-2　380V 改为 660V 运行的电动机典型改接方法汇总表

极数	380V 绕组数据		660V 绕组联结方式（改接方法）	改后电压/V	电压偏差（%）
	联结方式	并绕根数			
2	Y	2	Y_3—$\triangle_1$	681	－3
	Y	2	Z	660	0
	Y	4	Y_6—$\triangle_2$	681	－3

（续）

极数	380V 绕组数据		660V 绕组联结方式（改接方法）	改后电压/V	电压偏差（%）
	联结方式	并绕根数			
2	Y	4	2Z	660	0
	Y	3	$\triangle_3$	660	0
	2Y	1	$Y_1\frac{1}{3}-\triangle\frac{2}{3}$	654	+1
	2Y	1	Z	660	0
4	2Y	1	$Y_3—\triangle_1$	681	−3
	2Y	1	Z	660	0
	Y	2	$Y_5—\triangle_3$	640	+3
	Y	2	Z	660	0
6	Y	2	$Y_8—\triangle_4$	653	+1
	Y	2	Z	660	0
	2Y	1	$Y_4—\triangle_2$	653	+1
	3Y	1	$\triangle_3$	660	0
	6Y	1	$2\triangle_3$	660	0
8	2Y	1	$Y_5—\triangle_3$	640	+3
	2Y	1	Z	660	0
	4Y	1	2Z	660	0
	Y	2	$Y_{10}—\triangle_6$	640	+3

二、拆换绕组改压

如果用改接的方法行不通，或绝缘材料的耐压要加强，就要改换绕组。改换的绕组若和原绕组的嵌放形式都相同，则要保持铁心磁通不变，新绕组每个线圈的匝数为

$$W'_n = W_n \frac{U'_{相} \cdot a'}{U_{相} \cdot a} \tag{5-3}$$

式中　W_n——原绕组每个线圈的匝数；

W'_n——新绕组每个线圈的匝数；

$U_{相}$——原绕组的额定相电压（V）；

$U'_{相}$——新绕组额定相电压（V）；

a——原绕组的并联支路数；

a'——新绕组的并联支路数。

还要保持导体电流密度不变，新绕组的导体截面积 s' 为

$$s' = s \frac{U_{相} \cdot a \cdot n}{U'_{相} \cdot a' \cdot n'} \tag{5-4}$$

式中　s——原绕组导线截面积（mm^2）；

s'——新绕组导线截面积（mm^2）；

n——原绕组导线并绕根数；

n'——新绕组导线并绕根数。

计算时，先假定新绕组的并绕根数 $n'=1$，计算出 s'。如果计算出的导体直径大于 1.6mm，则再选多根并绕。

还要注意：

1）当高压改为低压时，槽内绝缘变薄，实际导体截面可比计算面积选择的大些，这样可提高效率。

2）当低压改为高压时，由于槽内绝缘变厚，实际导线面积比计算值选择的要小，以免造成槽满率过高，导致嵌放困难。

【例 5-5】 试将一台 1.5kW、380V 电动机改为在 660V 电压下使用。

解： 查本台电动机原绕组，为 1 路Y联结单股线圈，单层链式绕组，每圈匝数：

$W_n=62$ 匝，线径 $d=0.83$mm，因原绕组无法改接，需拆除重绕。

新绕组计算如下：

$$W_n'=W_n\times\frac{U_{相}'\cdot a'}{U_{相}\cdot a}=620\times\frac{380\times1}{220\times1}=107\text{ 匝}$$

$$S=\frac{1}{4}\pi d^2=\frac{1}{4}\times3.14\times0.83^2=0.54\text{mm}^2$$

$$S'=S\frac{U_{相}\cdot a\cdot n}{U_{相}'\cdot a\cdot n}=0.54\times\frac{1}{\sqrt{3}}=0.312\text{mm}^2$$

查选标准线径 $d=0.64$mm。

确定用 $\phi0.64$ 高强度漆包线，每圈绕 107 匝，按单层链式绕组嵌放，且仍为Y联结，进行重绕即可。

【例 5-6】 将一台 20kW 三相电动机由原来的Y联结 380V，改为△联结 380V 使用，目的是容易用Y-△起动。

解： 该电动机原来相电压为$\frac{380}{\sqrt{3}}=220$V，而改后相电压 $U_{相}=380$V，所以实质仍为改压改造。

原定子绕组为双层叠绕组，用 $\phi1.56$ 的纱包线 5 根并绕，1 路Y联结。若采用改接方法，经查表分析不行，只好拆除重绕。原绕组每圈匝数 $W_n=7$（5 根导线为 1 匝计）。

新绕组计算如下：

$$W_n'=W_n\frac{U_{相}'\cdot a'}{U_{相}\cdot a}=7\times\frac{380\times1}{220\times1}=12.12\text{ 匝}$$

取 $W_n'=12$ 匝

因原绕组：$S=\frac{1}{4}\pi\cdot d^2=\frac{1}{4}\times3.14\times1.56^2=1.91\text{mm}^2$

该新绕组：$n'=1$，新绕组导线截面积：

$$S'=S\frac{U_{相}\cdot a\cdot n}{U_{相}'\cdot a'\cdot n'}=1.91\times\frac{220\times1\times5}{380\times1\times1}=5.52\text{mm}^2$$

可选 QZ-2 高强度漆包线 $\phi1.35$、4 根并绕（截面为 5.724mm^2）。

因原绕组为纱包线，现改用漆包线，若槽满率还很低，还可选 $\phi1.4$，甚至 $\phi1.45$ 的漆包线 4 根并绕。如果能嵌放，对电动机的效率及功率都可适当提高。

经核对槽满率，最终确定：

选 4-$\phi1.45$ 的漆包线，每圈匝数为 12 匝，双层叠绕组，1 路△联结的新绕组。

第二节　三相异步电动机的改极计算

三相异步电动机的转速主要由磁极数决定，一般说来，三相异步电动机的转速 $n \approx 0.95\dfrac{60f}{p}$。式中 f 为电源的频率，在我国 $f=50\text{Hz}$；p 为磁极对数。

有时电动机与生产机械的转速不相配合，而手头又缺乏合适的电动机，这时就可改变原有的电动机的磁极对数，以得到合适的转速。另外，一些如水泵、风机等负载需要随着生产或季节的变化调节流量，但并不需要频繁、连续地调节。若将水泵、风机使用的单速电动机改为双速电动机，则既便于调节流量，又可大幅度节能。所有这些均需要改极改造。

改极的方法是改变定子绕组，使新绕组通入交流电流后形成新的磁极数。在此要说明一点，改极的电动机一般都是笼型转子电动机。主要因为笼型转子的磁极数随着定子绕组极数的改变而自动改变，且两者极数总是相同的。这样只变定子绕组即可。而绕线转子异步电动机，其定子绕组和转子绕组必须同时改极，相比笼型异步电动机，工作量大大增加。

本节重点将定子绕组单速改极的计算方法及单速电动机改成双速电动机的改极方法分别进行简要介绍。

一、单速变极计算方法

1. 单速变极时首先要考虑下面问题，并进行计算

1）定子和转子槽数的配合问题。以避免改后的电动机不能起动,噪声过大以及振动问题。

定子槽数 Q_1 和转子槽数 Q_2 必须符合下列不等式：

$$Q_1 - Q_2 \neq 0$$
$$Q_1 - Q_2 \neq \pm 2p$$
$$Q_1 - Q_2 \neq 1 \pm 2p$$
$$Q_1 - Q_2 \neq \pm 2 \pm 4p$$

2）改极时不宜使改极前后的极数相差太多。例如不宜将 6 极电动机改为 2 极电动机，也不宜将 2 极电动机改为 6 极电动机。

3）当极数减少时，转速将增加，这时要验算转子的机械强度，验算方法是计算转子表面的圆周线速度 V_2。

$$V_2 = \frac{\pi D_2 n_e}{60 \times 100} \tag{5-5}$$

式中　V_2——转子表面的圆周线速度；

D_2——转子外径（cm）；

n_e——转子转速（r/min）。

笼型转子的异步电动机 $V_2 \leqslant 40 \sim 60\text{m/s}$

4）转速增加后，电动机的额定转矩要减小，所以还要校验电动机的转矩是否满足生产

机械的要求。

$$T_e = 9500 \cdot \frac{P_e'}{n_e} \tag{5-6}$$

式中 T_e——转速增加后电动机的额定转矩（N－m）；

P_e'——转速增加后电动机的额定功率（kW），P_e'可根据表 5-3 中经验公式进行计算；

n_e——转速增加后电动机的额定转速（r/min）。

5）极数增加时（即转速减小），额定功率必然随之减少。根据表 5-1 中经验公式计算出来的额定功率 P_e'应该校验是否能满足生产机械的要求。

2. 根据表 5-3 进行计算，确定绕组数据

表 5-3　三相异步电动机改极计算经验公式

改极方案	每相串联匝数 N/匝	导线截面积 S/mm²	裸导线直径/mm	功率/kW
2 极改 4 极	$N_4=(1.70\sim1.80)\dfrac{a_4K_{w2}}{a_2K_{w4}}N_2$	$S_4=(0.55\sim0.60)\dfrac{a_2}{a_4}S_2$	$d_4=(0.74\sim0.77)\sqrt{\dfrac{a_2}{a_4}}d_2$	$P_4=(0.55\sim0.60)\ P_2$
4 极改 2 极	$N_2=(0.80\sim0.90)\dfrac{a_2K_{w4}}{a_4K_{w2}}N_4$	$S_2=(1.1\sim1.25)\dfrac{a_4}{a_2}S_4$	$d_2=(1.05\sim1.12)\sqrt{\dfrac{a_4}{a_2}}d_4$	$P_2=(1.15\sim1.20)\ P_4$
4 极改 6 极	$N_6=(1.35\sim1.45)\dfrac{a_6K_{w4}}{a_4K_{w6}}N_4$	$S_6=(0.69\sim0.74)\dfrac{a_4}{a_6}S_4$	$d_6=(0.83\sim0.86)\sqrt{\dfrac{a_4}{a_6}}d_4$	$P_6=(0.6\sim0.65)\ P_4$
6 极改 4 极	$N_4=(0.85\sim0.90)\dfrac{a_4K_{w6}}{a_6K_{w4}}N_6$	$S_4=(1.1\sim1.17)\dfrac{a_6}{a_4}S_6$	$d_4=(1.05\sim1.08)\sqrt{\dfrac{a_6}{a_4}}d_6$	$P_4=(1.15\sim1.25)\ P_4$
6 极改 8 极	$N_8=(1.25\sim1.30)\dfrac{a_8K_{w6}}{a_6K_{w8}}N_6$	$S_8=(0.75\sim0.79)\dfrac{a_6}{a_8}S_6$	$d_8=(0.87\sim0.89)\sqrt{\dfrac{a_6}{a_8}}d_6$	$P_8=(0.70\sim0.75)\ P_6$
8 极改 6 极	$N_6=(0.85\sim0.95)\dfrac{a_6K_{w8}}{a_8K_{w6}}N_8$	$S_6=(1.04\sim1.17)\dfrac{a_8}{a_6}S_8$	$d_6=(1.02\sim1.08)\sqrt{\dfrac{a_8}{a_6}}d_8$	$P_6=(1.15\sim1.20)\ P_8$

注：1. 表中下标 2、4、6、8 代表 2 极、4 极、6 极、8 极。

2. 每相串联匝数经验公式前系数的选择，对于铁心质量不好的取大值，反之取小值。

3. 导线截面积经验公式前系数，对于早年产品取大值。

4. 表中数据，适用于供电电压，频率及接法均不改变的情况。

【例 5-7】 将一台 6 极笼型电动机改为 4 极电动机，重配一个适当的定子绕组。

解：1）首先查出这台电动机的主要数据：

$P_{e6}=7.5\text{kW}$，$I_{e6}=15.53\text{A}$，△联结，$U_e=380\text{V}$，$2p=6$。

其铁心及定子绕组数据为

$D_1=24.5\text{cm}$，$D=17.4\text{cm}$，$L=17\text{cm}$，$\dfrac{Q_1}{Q_2}=\dfrac{36}{33}$。单层链式绕组，每圈匝数 $W_n=37$

（匝），并联支路数 $a=1$，导线是 1 根 $\phi1.4$ 漆包线。转子外径 $D_2=17.33\text{cm}$。

2）6 极时每相串联匝数 W_6 为

$$W_6=\frac{Q_1W_n}{2ma_6}=\frac{36\times37}{2\times3\times1}=222\ （匝）$$

6 极时每极每相槽数 q_6 为

$$q_6=\frac{Q_1}{2mp}=\frac{36}{2\times3\times3}=2$$

因为是单层绕组，查 $K_W=K_d$ 表 4-3 得 6 极的绕组系数 K_{W6} 为

$$K_{W6}=0.956$$

3）4 极时，每极每相槽数 q_4 为

$$q_4=\frac{Q_1}{2mp}=\frac{36}{2\times3\times2}=3$$

也嵌为单层绕组（单层交叉式）查表 4-3 得 $K_{W4}=0.958$

4）根据表 5-3 经验公式计算：

每相串联匝数 W_4 为

$$W_4=(0.85\sim0.90)\frac{0.4K_{W6}}{0.6K_{W4}}W_6=0.9\times\frac{1\times0.956}{1\times0.96}\times222=199\ 匝。$$

4 极时每圈匝数：

$$W_{n4}=\frac{2mW_4\cdot a_4}{Q_1}=\frac{2\times3\times199\times1}{36}=33.2$$

取 $W_{n4}=33$（匝）：

4 极时导线直径：

$$d_4=(1.05\sim1.08)d_6=(1.05\sim1.08)\times1.4=1.47\sim1.51\text{mm}$$

取标准线径：$d_4=1.5\text{mm}$（即 4 极用 1—$\phi1.5$）

4 极时额定功率：

$$P_{e4}=(1.15\sim1.25)P_{e6}=(1.15\sim1.25)\times7.5=8.6\sim9.4\text{kW}$$

取 $P_{e4}=9\text{kW}$

5）验算：转子表面的圆周速度：

$$V_2=\frac{\pi D_2\cdot n_4}{60\times100}=\frac{3.14\times17.33\times1400}{60\times100}=12.7\text{m/s}$$

$V_2<(40\sim60)$ m/s 符合要求。

计算额定转矩：

$$T_{e4}=9550\frac{P_{e4}}{ne4}=9550\times\frac{9}{1400}=61.4\text{N}\cdot\text{m}$$

T_{e4}应大于负载转矩。

结果：4 极绕组确定为：

单层交叉式绕组，每圈的匝数 $W_{n4}=33$ 匝

线径为 1—$\phi1.5$，支路数 $a=1$，仍用△联结。

额定功率为 $P_e = 9\text{kW}$。

二、单速电动机改为双速电动机

1. 确定改绕方案

(1) 选择待改的单速电动机

主要考虑四个方面:

1) 单速电动机的磁极数按表 5-4 优先选用方案 1 的磁极数，其次选用方案 2 的磁极数。

表 5-4 单速电动机磁极数的选择

双速电动机磁极数		2/4	4/8	4/6	6/8	2/8
方案 1	单速电动机极数	4	4	6	6	4
方案 2		2	6	4	—	—

2) 单速电动机的功率比改绕后同极数电动机所需功率大 1 ~ 2 个功率等级。

3) 定子槽数应能适应改绕的磁极数要求，以形成三相对称绕组。一般可按表 5-5 选择。

表 5-5 可供改绕的电动机定子槽数

双速电动机极数	2/4	4/8	4/6	6/8	2/8
单速电动机定子槽数	24、36、48、54、60、72	24、36、48、60、72	36、48、72	36、54、72	24、36、72

4) 核对定、转子槽数配合，仍然无 $Q_1 - Q_2 = 0$、$\pm 2p$、$1 \pm 2p$、$\pm 2 \pm 4p$ 的配合关系，使改绕后的电动机性能好些。

(2) 记录单速电动机的有关数据

主要包括:

1) 名牌全部数据;

2) 定、转子槽数 Q_1 和 Q_2;

3) 每槽导线数 N_1，导线直径 d 及并绕根数 n;

4) 节距 Y_1 及并联支路数 a;

5) 绕组形式。

(3) 选择改绕方案

根据电动机功率及负载特性综合考虑，相关数据可从表 5-6 中选取。对恒转矩负载可选用正规分布绕组 2 丫/丫、△/丫、接法。对恒功率负载可选用非正规分布绕组 2 丫/△、丫/丫、△/△、2 丫/2 丫联结法。一般采用双层绕组。

表 5-6 常用单速电动机变极方案

极 数	槽 数	节 距	绕组系数		联结方式及引出线根数	变极原理
			极 数	K_w		
2/4	24	1—7	2 4	0.677 0.836	2 丫/丫 (6) 2 丫/△ (6) 2 丫/2 丫 (9)	以 2 极为基本极，一半反接
	36	1—10	2 4	0.676 0.831		
	48	1—13	2 4	0.676 0.829		
	60	1—16	2 4	0.676 0.828		

（续）

极　数	槽　数	节　距	绕组系数		联结方式及引出线根数	变极原理
			极　数	K_w		
4/8	24	1—4	4 8	0.683 0.866	2Y/Y（6） 2Y/△（6） 2Y/2Y（9）	以4极为基本极，一半反接
		1—5	4 8	0.837 0.75		
	36	1—6	4 8	0.735 0.831		
	48	1—7	4 8	0.677 0.836		
	60	1—9	4 8	0.711 0.828		
4/6	36	1—7	4 6	0.831 0.644	2Y/Y（6） 2Y/△（6）	以4极为基本极，一半反接
		1—8	4 6	0.9 0.622		
	36	1—7	4 6	0.72 0.88		非正规分布，无基本极
		1—8	4 6	0.781 0.85		
	48	1—9	4 6	0.72 0.88		
6/8	36	1—6	6 8	0.622 0.945	2Y/Y（6） 2Y/△（6）	以8极为基本极，一半反接
		1—7	6 8	0.644 0.83		
	36	1—6	6 8	0.85 0.815		非正规分布，无基本极
		1—7	6 8	0.88 0.72		

2. 改绕计算

（1）确定双速绕组的每槽导体数

1）改绕成的双速电动机，其中有一磁极数与原单速电动机的磁极数相同，从保证该磁极数下有相同磁通密度的原则出发，按下式初步计算双速绕组的每槽导体数 N_1^*。

$$N_1^* = \frac{U_\phi \cdot K_W' \cdot a}{U_\phi' \cdot K_W \cdot a'} N_1' \qquad (5\text{-}7)$$

式中　N_1'——单速绕组每槽导线数（根/槽）；

U_ϕ'——单速绕组的相电压（V）；

K_W'——单速绕组系数；

a'——单速绕组的并联支路数。

U_ϕ、K_W、a——与原单速电动机同极数的双速绕组数值。

2）修正每槽导线数

双速电动机两种磁极数下的磁通密度比为

$$\frac{B_{\delta \text{II}}}{B_{\delta \text{I}}}=\frac{U_{\phi \text{II}} \cdot P_{\text{II}} \cdot W_1 \cdot K_{W\text{I}}}{U_{\phi \text{I}} \cdot P_{\text{I}} \cdot W_{2\text{II}} \cdot K_{W\text{II}}} \tag{5-8}$$

式中　B_δ——气隙磁通密度；

W——每相串联匝数。

绕组串联时：$\frac{W_{\text{I}}}{W_{\text{II}}}=1$；并联时：$\frac{W_{\text{I}}}{W_{\text{II}}}=\frac{1}{2}$；

p 为磁极对数

注脚Ⅰ和Ⅱ分别为少数极和多数极的相关量。

设$\frac{B_{\delta \text{II}}}{B_{\delta \text{I}}}=\frac{1}{\alpha}$，则双速绕组每槽导线数可用下列近似公式修正：

$$N_1=\frac{1+\alpha}{2}N_1^*$$

（2）确定导线直径

$$\text{d}=\sqrt{\frac{N_1'}{N_{\text{I}}}} \cdot d' \tag{5-9}$$

式中　d'——原单速绕组的导线直径（mm）。

（3）估算功率

1）与原单速电动机同极数的功率为

$$P=\frac{U_\phi \cdot a \cdot d^2}{U_\phi' \cdot a' \cdot d'^2} \cdot P'$$

式中　P'——原电动机功率（kW）。

2）双速电动机两种极数下的功率比：

$$\frac{P_{\text{II}}}{P_{\text{I}}} \approx K\frac{U_{\phi \text{II}} \cdot a_{\text{II}}}{U_{\phi \text{I}} \cdot a_{\text{I}}} \tag{5-10}$$

式中　P_{II}——多极数时的功率（kW）；

P_{I}——少极数时的功率（kW）；

K——功率降低系数，$K=0.7\sim0.9$，近极比取大值，远极比取小值。

3. 绕组的调制、嵌放和接法（见第四章）

【例 5-8】 试将一台 22kW 电动机改为 2/4 极双速电动机，带恒转矩负载。

解：（1）分析改绕的可能性：

1）将该台电动机（2 极）改为 2/4 极后，电动机的输出功率将要减小。

2）该台电动机定子槽数 $Q_1=36$，转子槽数 $Q_2=28$，其配合对 2/4 极电动机均无 $Q_1-Q_2=0$、$\pm 2p$、$1\pm 2p$、$\pm 2\pm 4p$ 的关系。

3）2 极改为 2/4 极后，能满足$\frac{Q_1}{p}=$整数及$\frac{Q_1}{t \cdot m}=$整数$\left(t\text{ 为}\frac{Q_1}{p}\text{的最大公约数，}m=3\right)$的条件可形成三相对称绕组（见第四章）。

（2）改绕计算

1）因改后电动机带恒转矩负载，选用正规分布绕组，2 Y/Y接法。双层叠绕组，$y=9$，

绕组系数 $K_{W4}=0.831$，$K_{W2}=0.676$。（见表 5-6）

2）已知数据，单速电动机：功率 $P_e'=22\text{kW}$，△联结，相电压 $U_\phi'=380\text{V}$，并联支路数 $a'=1$，线径 $d'=4-\phi1.35\text{mm}$。每槽导体 $N_1'=20$，双层叠绕 $y'=12$，$q'=6$，绕组系数 $K_W'=K_d'K_y'=0.956\times0.866=0.828$。

双速电动机 $y=9$，2Y/Y接法，双层绕组。4 极时，$U_2=220\text{V}$，$a_4=1$，$K_{W4}=0.831$。2 极时，$U_2=220\text{V}$，$a_2=2$，$K_{W2}=0.676$。

3）计算匝数、线径及功率

①每槽导线数（以 2 极为基本极）：

$$N_1'=\frac{U_2\cdot K_W'\cdot a_2}{U_\phi'\cdot K_{W2}\cdot a}\cdot N_1'=\frac{220\times0.828\times2}{380\times0.676\times1}\times20=28.29\text{ 根/槽}$$

修正每槽导线数：

$$\frac{B_{\delta4}}{B_{\delta2}}=\frac{U_{\phi4}\cdot p_4\cdot W_2\cdot K_{W2}}{U_{\phi2}\cdot p_2\cdot W_6\cdot K_{W6}}=\frac{220\times2\times1\times0.676}{220\times1\times2\times0.831}=\frac{1}{1.229}$$

$$N_1=\frac{1+\alpha}{2}N_1^*=\frac{1+1.229}{2}\times28.29=31.53\text{ 根/槽}$$

取 $N_1=32$ 根/槽，每个线圈 $W_n=16$ 匝（双层）。

②确定线径：

$$d=\sqrt{\frac{N_1'}{N}}d'=\sqrt{\frac{20}{30}}\times1.35=1.1\text{mm}$$

因为原单速电动机为 4 根并绕，所以也按 4 根 $\phi1.1\text{mm}$ 计算，总截面积 $S^*=3.8\text{mm}^2$ 按等截面原则换算得实际导线应该是：3 根 $\phi1.3\text{mm}$ 并绕。

③功率估算：

2 极时：

$$P_2=\frac{U_2\cdot a_2\cdot d_2^2\cdot n_2}{U_\phi'\cdot a'\cdot d'^2\cdot n'}\times p'=\frac{220\times2\times1.3^2\times3}{380\times1\times1.35^2\times4}\times22=17.67\text{kW}$$

4 极时，取功率比 $K=0.8$

$$P_4=K\frac{U_4\cdot a_4}{U_2\cdot a_2}P_2=\frac{220\times1}{220\times2}\times0.8\times17.67=7\text{kW}$$

4）计算结果：双速电动机数据为

$U_e=380\text{V}$，2Y/Y接法，2/4 极，$P_e=17.67/7\text{kW}$

绕组数据为双层绕组 $y=1$—10，每个线圈 $W_n=16$，用 $3\times\phi1.3\text{mm}$ 漆包圆铜线。

（3）绕组的调制、嵌放和接法参阅第四章第四节。

第三节　三相电容式电动机简介

近年来，工程技术人员对原有电动机进行了多方面的改进，使三相异步电动机向着体积小、功率大、效率高、性能更好的方向发展。其中，三相电容式电动机就是其中一例，这种电动机是在原来普通三相电动机的基础上对定子绕组进行改造，在改造后的定子上放置两套

三相对称绕组而成的。其中一套三相绕组为主绕组（用下标 m）；另一套三相绕组为副绕组（用下标 c）。两套绕组在空间彼此分别相互差 90° 电度角，且副绕组每相外串一个适当电容后，和主绕组并联工作。图 5-5 所示为其定子绕组连接示意图。

通过对这种电动机的样机理论分析、计算和性能测试，三相电容式电动机有如下几个优点：

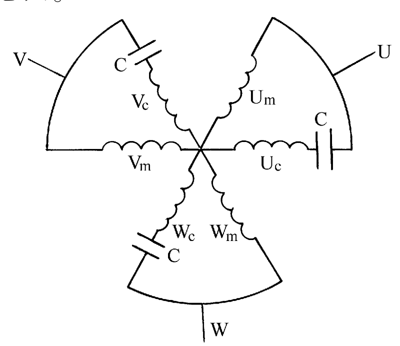


图 5-5　三相电容式电动机定子绕组连接示意图

1）能够大大提高电动机的功率因数，在额定负载时可以达到 1。

2）若选择合理的绕组节距，每极每相槽数及绕组形式可以使谐波磁势得到最大限度的降低，电机性能得到改善，效率提高。

3）起动时，串联不同值的电容器，可改变起动转矩的大小。这种电动机尤其在中、小低速风机和泵类负载中更适用。

三相电容式电动机的定子绕组分布和嵌绕特点主要是：每相的主、副绕组在空间互差 90°电度角；三相主或副绕组完全相同，相间在空间互差 120°电度角。

现举例说明这种绕组的分布接线规律。

【例 5-9】　一台 Y802-4 型普通电动机，重绕为三相电容式电动机，其定子槽 $Q=24$，$2p=2$。

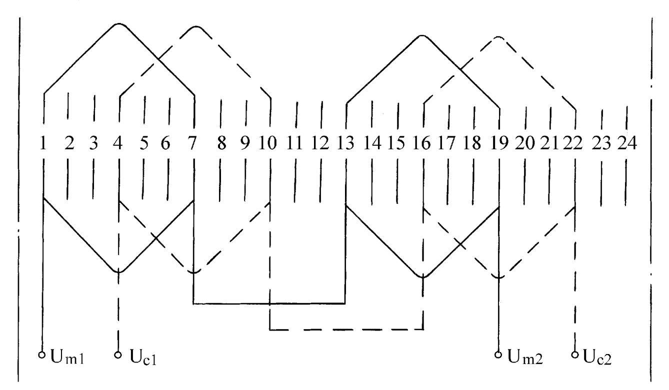
定子绕组采用了两种嵌放方案，这两种方案的绕组形式、导线匝数、线径都不相同。

第一种，取 $q=1$，这样整体上就采用了单层链式绕组，为庶极接法。图 5-6a 所示为 U 相绕组的展开图。图 5-6b 所示为三相绕组展开图。

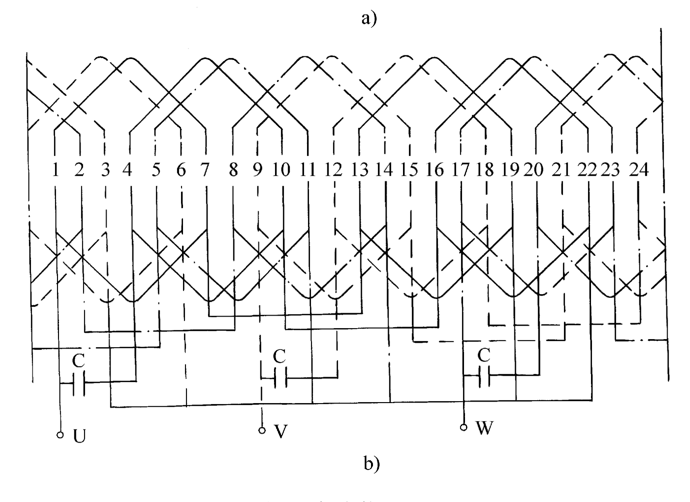
嵌放工艺要点：

1）选接线模（取 $y=\tau=6$（1—7）），线圈节距大小都相同，每个线圈为一个极相组，主，副绕组各绕 6 组（主、副绕组线圈的线径、匝数均不同）。

2）用交叠法嵌放绕组：先嵌放 1 个副绕组线圈的沉边于槽内，再嵌放 1 个主绕组线圈的沉边用于第二个槽中，退空 2 槽，再嵌放副绕组沉边，并将其浮边也嵌入槽中（$y=1$—7），再嵌放主绕组的沉边



a)



b)

图 5-6　三相电容式绕组展开图（一）

a）U 相主、副绕组展开图　b）三相绕组展开图

和浮边，退空 2 槽，吊起 2 个浮边……嵌放顺序见表 5-7。

表 5-7　单层链式绕组嵌放顺序表

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	副 6	主 7	副 10		主 11		副 14		主 15		副 18		
				副 4		主 5		副 18		主 9		副 12	
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	主 19		副 22		主 23		副 2		主 3				
		主 13		副 16		主 17		副 20		主 21	副 24	主 1	

3）为保证每相的主、副绕组互差 90°，先找出各相主、副绕组位置（互差 3 个槽（1—4）），且各相出线端位置互差 240°（1—9），各相主、副绕组并联后为Y联结，如图 5-6b 所示。

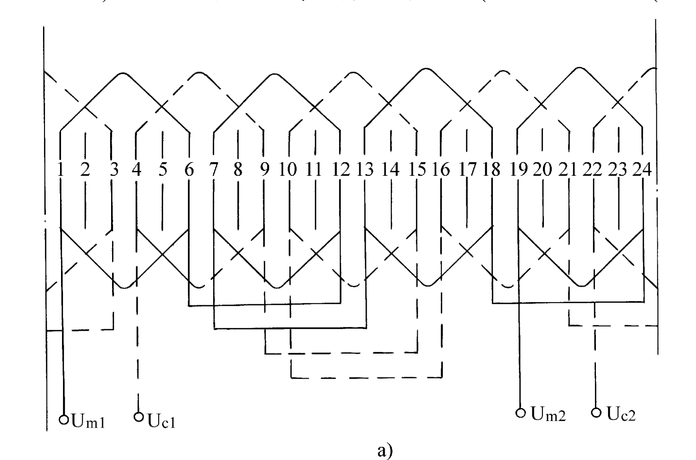
第二种，主、副绕组均取 $q=2$，三相主绕组和三相副绕组分别为链式绕组，但主、副绕组在同一槽内，分上、下层，副绕组嵌放在下层，主绕组嵌放在上层。图 5-7a 所示为这种绕组的 U 相绕组（主、副）的展开图。图 5-7b 和图 5-7c 所示为三相绕组的展开图，为显极接法。

嵌放工艺要点：

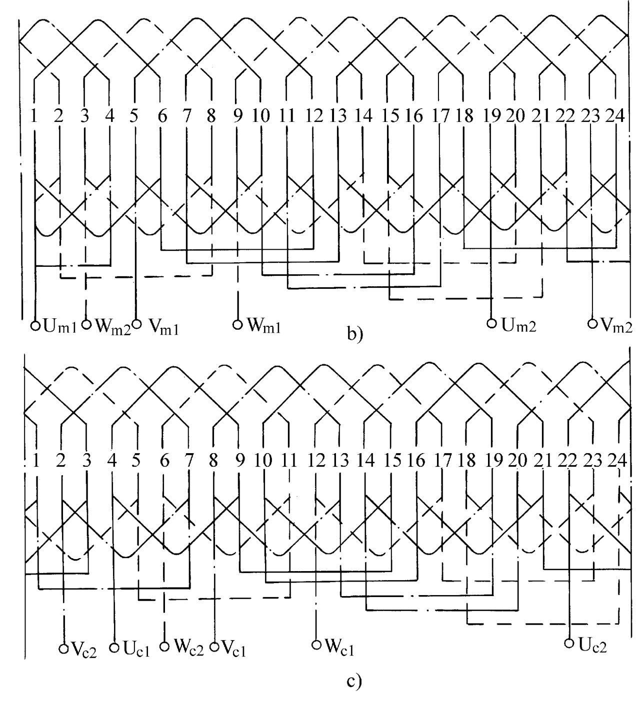
1）选好绕线模，分别绕制 12 个主绕组线圈和 12 个副绕组线圈（主、副绕组线圈的大小相同，但匝数、线径不同）。

2）主、副绕组均为链式绕组，嵌放采用交叠式（和前面单层链式绕组嵌法相同）。注意，先在下层嵌放副绕组，加层间绝缘后，再在上层嵌放主绕组，且两种绕组的对应边一定要互差 90°电角度（1 ~4 槽）。

3）分别按“首—首”或“尾—尾”将各相主、副绕组分别串联连接，如图 5-7 所示。主、副绕组分别有 6 个出线端（3 个首端，3 个末端），待在出线盒外端串电容后，再将主、副绕组并联连接。



a)



c)

图 5-7　三相电容式绕组展开图（二）

a）U 相绕组展开图　b）三相主绕组展开图

c）三相副绕组展开图

第四节　绕组绝缘电阻偏低的检查和处理

一、绝缘电阻偏低的原因

电动机的绝缘电阻主要指定子及转子绕组对地（机座）之间和绕组的各相之间的绝缘电阻。合格的绝缘电阻值，对于额定电压 1kV 以下的电动机，最低为 0.5MΩ；1kV 以上的电动机最低为 1mΩ/1kV（热态）。如果绝缘电阻值低于合格值，电动机在运行时，绕组就有被击穿烧坏的可能。

电动机绝缘电阻偏低，一般有以下几个方面的原因：

1）绕组受潮：电动机较长时间停用或存储，受周围潮湿空气、雨水、盐雾、高腐蚀性气体及灰尘油污等侵入，使绕组附着一层导电物质，引起绝缘电阻的下降。

2）绝缘老化：使用较长时间，电动机过热状态工作，受电磁力的作用，主绝缘出现龟裂、分层、酥脆等轻度老化现象。

3）绝缘存在薄弱环节：如选用的绝缘材料质量不好，厚度不够，在嵌线时被损伤等，或者原来绝缘处理不良，经使用后绝缘状态变的更差，以致整机或者一相绝缘电阻偏低。

二、绝缘电阻的检查

绝缘电阻的检查一般用绝缘电阻表（又称兆欧表或摇表），额定电压 500V 以下的电动机，用 500V 绝缘电阻表；500～3000V 电动机，用 1000V 绝缘电阻表；3000V 以上的电动机，用 2500V 绝缘电阻。

绝缘电阻表在遥测前，应分别对绝缘电阻表作一次开路和短路试验，即将连接线开路，摇动手柄，指针应指向“∞”处；然后将两根连接线碰接，轻摇手柄，指针应指向“0”处，否则说明绝缘电阻表有问题，需检修好才能使用。

测量电动机的绝缘电阻时，绝缘电阻表接地端子（E 或 N）引出的一根线接于机壳上，线路端子（L）一端接于绕组端头，以 120r/min 的转速摇手柄，待表针指示稳定后再读数。

三、绕组的干燥处理

绕组绝缘电阻偏低，大多数是由绕组受潮造成的，绕组受潮一般要进行干燥处理。对于绝缘轻度老化或存在薄弱环节的绕组，干燥后还要进行浸漆与烘干。下面介绍常见的几种干燥方法。

1. 烘房（烘箱）干燥处理

对于备有烘房或烘箱的地方，这是最简便的方法，它适用于任何受潮程度的电动机。具体操作方法是，将受潮电动机放入烘房（烘箱）内，温度由低到高逐渐调节到 100℃左右，即可连续进行到烘干为止。

2. 热风干燥法

此法适用于任何型式及受潮程度的电动机，操作方法是，用红砖砌成夹层干燥室，夹层中填入石棉粉等隔热材料，利用鼓风机将电热丝产生的热量变成热风，吹拂电动机，将电动机内的潮气带走，如图 5-8 所示。改变电热丝的接法或数量可调节温度，利用分道阀门调节风量。

3. 光热干燥法

容量较小及轻度受潮的电动机，可利用红外线灯泡或普通白炽灯泡的光热效应进行烘烤。此法简单可行。改变灯泡大小、数量或距离即可改变烘烤温度。

4. 电流干燥法

电流干燥法的特点是电动机内部温度高于外部温度，故干燥迅速有效。对于被水浸泡过的电动机，为防止绝缘膨胀或被击穿，或者采用直流时可能产生电解作用，一般不要采用此法干燥。如果采用，应先用前述方法烘干到一定程度后，再用电流法干燥。

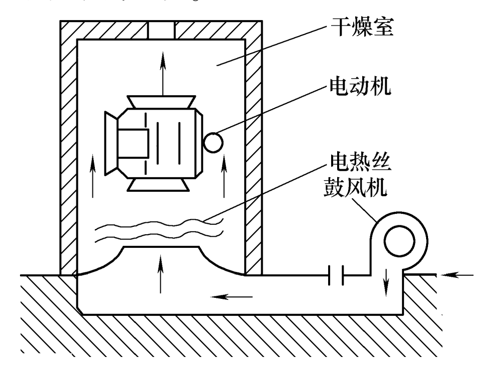


图 5-8　热风干燥示意图

1）对笼型电动机，采用单相交流电或直流电，用调压器、变阻器或改变绕组接法来调节电流。一般控制在被烘干电动机额定电流的 50% ~70%（通常每 1 千瓦取 1 安），所需电压约为额定电压的 7% ~15%，电源（变压器）的容量 S 为：

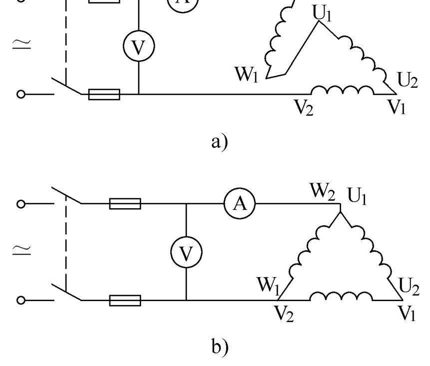
$$S=\frac{(0.07\sim0.15)\ U_{N}\times\ (0.5\sim0.7)\ I_{N}}{1000}$$

式中　U_N——电动机的额定电压（V）；

I_N——电动机的额定电流（A）。

电流干燥法的典型接线如图 5-9 所示。

其中图 5-7a 用于烘干 6 个出线头的电动机，图 5-7b 用于烘干 3 个出线头的电动机，图 5-7c 用于烘干小型电动机。采用串联接线时，三相绕组按图 5-7a 连接，将其中一相反接，使三相感应电动势同方向，在同样电压下绕组电流比正接法减小 1/3 ~1/2，从而可以直接采用 220V 单相电源烘烤 10kW 以下的电动机。对 100kW 以下的电动机，也可用交流弧焊机作电源可以满足烘干电流的要求，调节也十分方便。



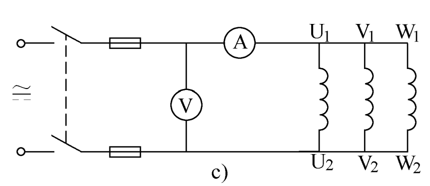


图 5-9　笼型电动机电流干燥接线图

a）串联　b）串并联　c）并联

采用电流烘干法时，一般是将转子抽出，以利于潮气外逸。如果放入转子以减小定子电流，则应将转子固定住，在定子内放入与铁心长度相等的铁管，也能起到限制电流的作用。如果用 220V 市电烘烤 10kW 电动机，在定子内放入 170mm，$\phi60\times2$ 毫米的钢管 5 根，电流可控制在 9A 左右。

2）对绕线转子电动机，将转子绕组串接水电阻，固定住转子。定子绕组接三相电源，其电压为额定电压的 15% ~20%。调节水电阻，使定、转子电流约为各自额定值的 50% ~70%，如果缺乏从定子绕组通电所需要的电压，也可以改为从转子供电，其电压为转子开路电压的 15% ~20%。

当转子直接短路时，可以同笼型电动机一样，从定子绕组加单相交流或直流电进行烘干。绕线转子电动机采用交流电干燥时，应特别注意监视转子端部钢绑线的温度不超过 95℃。

5. 铁损干燥法

这种方法是在定子铁心上绕以励磁线圈并通入单相交流电，使定子铁心产生磁滞及涡流损耗而发热，如图 5-10 所示。

交流电源通过刀开关 QK 和熔断器 FU 接到线圈两端，电压及电流可分别用万用表及钳行电流表测量。此法适用于烘干大型电动机，能量损耗小。绕线前将转子抽出，定子内膛清扫干净，绕线方向一致，所需励磁线圈匝数 N 按下式计算。

图 5-10　定子铁损干燥接线图

$$N = \frac{45U}{S_{\mathrm{Fe}}}$$

式中　U——电源电压（V）；

S_{Fe}——铁心截面积（cm^2）

励磁电流 I 按下式求得：

$$I = (1.5 \sim 2.5)\frac{\pi D}{N}$$

式中　D——定子铁心平均直径（cm）。

根据算得的电流值，即可选择绝缘导线的截面。励磁线圈绕好后，通电前要测量电动机绕组及励磁线圈的绝缘电阻，在上中下三个部位安放三支温度计，它们的感温球紧贴铁心，并用油灰粘封，升温速度为 5 ~ 8℃/h 最高温度控制在 90℃左右。要特别注意上部温度，以免局部过热，改变励磁线圈匝数或周期性的切断电流可调节干燥温度。

四、干燥处理的注意事项

1）干燥前应将电动机吹扫干净，如果用电流干燥法，机壳必须接地，以防触电。

2）对封闭式电动机，当整机通电加热时，应拆开端盖以散出潮气，否则潮气停留在电动机内部，当温度下降时，潮气侵入绕组，使绝缘电阻再度下降。

3）干燥电动机时，除保留必须的通风排气以外，应将电动机与周围空气隔绝起来，以减少热量损失。

4）干燥时要用温度计测量绕组温度，升温速度一般不大于 10℃/h，绕组的最高加热温度控制在 100 ~ 110℃左右。

5）在干燥过程中，每隔 1h 测量并记录一次温度、电流及绝缘电阻（遥测绝缘电阻时要断电）。开始时由于绕组温度的提高及潮气的大量扩散，绝缘电阻呈下降状态，降到某最低值后，便逐渐回升，最后 3 ~ 5h 内趋于稳定或微微上升，当绝缘电阻达到 5MΩ（380V 电动机）以上时，干燥即可结束。

第五节　绕组接地故障的检修

一、绕组接地的原因

绕组接地俗称碰壳。当发生绕组接地故障时，电动机起动不正常，机壳带电，熔断器熔断，用绝缘电阻表测量时绝缘电阻为零。绕组接地的原因有以下几种：

1）绝缘热老化：电动机使用日久或经常过载运行，导致绕组及引线的绝缘热老化，降低或丧失绝缘强度而引起电击穿，导线绕组接地。绝缘热老化一般表现为绝缘发黑、枯焦、酥脆、剥落等。

2）机械性损伤：嵌线时主绝缘受到外伤，线圈在槽内松动，端部绑扎不牢，冷却介质中尘粒过多，使电动机在运行中线圈发生振动，摩擦及局部位移而损坏绝缘。

3）局部烧损：由于轴承损坏或其他机械故障，造成定、转子相擦（扫膛），铁心产生局部高温烧坏主绝缘而接地。

4）铁磁损坏：槽内或线圈上附有铁磁物质，在交变磁通作用下产生振动，将绝缘磨损（洞或沟状）。若铁磁物质较大，则产生涡流，引起绝缘的局部热损坏等。

二、接地故障的检查

首先用绝缘电阻表或万用表确定故障相，然后采用下列方法查找接地点。

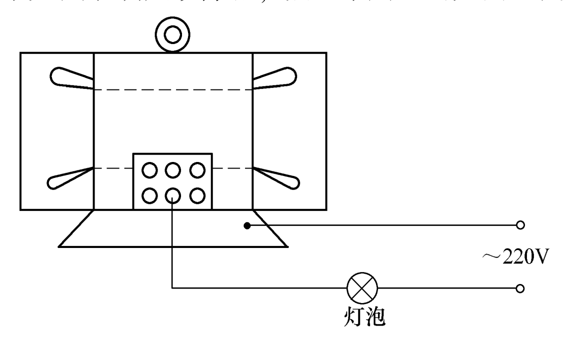


图 5-11　用校验灯查找接地点

1. 校验灯法

拆下端盖，抽出转子，将一只 40～60W 的灯泡串接于 220V 相（火）线与绕组之间。如图 5-11 所示，若灯泡正常发光，用木（竹）片敲打或撬动槽口处线圈，灯闪时的撬动处即为接地点。

2. 电流烧穿法

在线圈和铁心之间加低压电源，其接线如图 5-12 所示。图中 TV 为自耦变压器，TL 为行灯变压器，电流可用钳形电流表测量。小容量电动机通以 2 倍额定电流 30s，大容量电动机通以 0.2～0.4 倍额定电流，高压电动机限制在 5A 以内。通电后，仔细观察定子内膛，槽口等部位，冒烟或绝缘有焦痕处即是接地点。

3. 电流定向法

将故障相（例如 U 相）首末端（U_1、U_2）并联加直流电压，电源可用 6～12V 蓄电池并、串联可调电阻 R_0 调节可调电阻，使电路中电流为 0.2～0.4 倍额定电流，线圈内的电流方向如图 5-13 所示。由图可见，故障所在槽内的电流一同流向接地点。将小磁针逐槽移动，磁针改变方向处即为接地点所在的槽。在将磁针沿槽轴向移动，磁针在故障点 g 处改变指向。

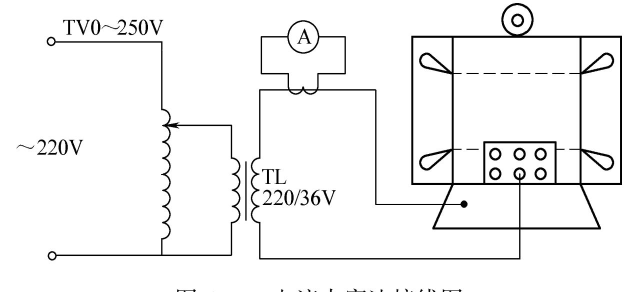


图 5-12　电流击穿法接线图

4. 电压降法

此法适用于金属性接地的高压电动机，其接线如图 5-14 所示。测试可用交流电或直流电，用交流电时应将转子抽出。调节变阻器（用交流电时调节调压器）使电压表（可用万用表电压挡）指示适当数值 U。设 U_1、U_2 分别为绕组首端和末端至接地点的电压值，因 $U_1+U_2\approx U$，U_1 点至接地点 g 的距离与电压降成正比，即

$$\frac{L_1}{L}=\frac{U_1g}{U_1+U_2}=\frac{U_1}{U_2}\times 100\%$$

式中　L_1——绕组首端至接地点的距离，

L 为绕组总长度。

若已知绕组的总长度，即可算出绕组首端至接地点的距离。

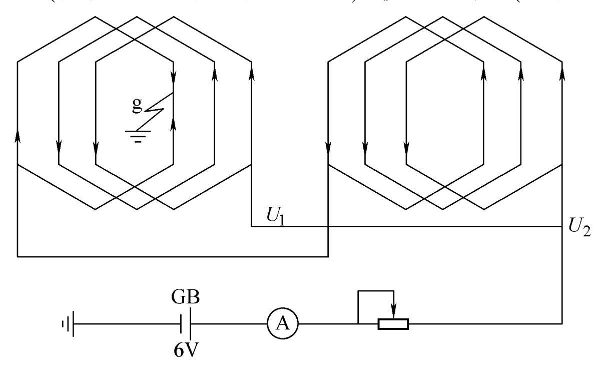


图 5-13　电流定向法接线图

【例 5-10】　一台 6kV 的电动机，U 相发生金属性接地，试用电压降法查找接地点。

解：按图 5-14 接线，采用电焊机调压供电。测得 $U=60\text{V}$，$U_1=17\text{V}$，$U_2=42.5\text{V}$。代入上面公式得

$$\frac{L_1}{L}=\frac{17}{60}\times 100\%=28.3\%$$

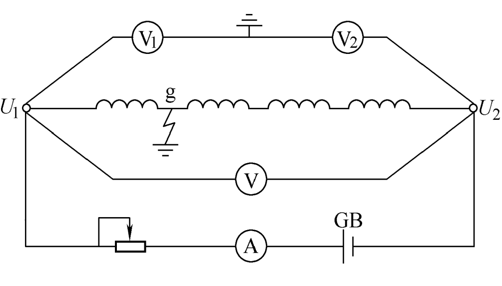


图 5-14　电压降法接线图

该电机的 U 相有 16 个线圈串联，即接地点在 $16\times 28.3\%=4.53$ 个线圈处。重点检查 4 和 5 两个线圈的两端，在第 5 个线圈端槽口处发现接地点。

三、接地故障的修复

1. 局部修理

如果接地点在槽口等易见处，可将绝缘垫片或天然云母片插入铁心与线圈之间，用绝缘带包扎好，涂上自干绝缘漆即可。如果损坏在槽内上层边，可打出槽楔，修补槽绝缘，或将线匝翻出槽外处理。若接地点在槽底，则需抬出一个节距的线圈边。此时应将绕组加热软化，操作要小心，处理完毕，应浸漆一次。

2. 面层嵌线法

这是更换部分线圈的好办法。其工艺过程如下：将线圈加热到 110℃ 左右，对单层绕组，迅速将损坏线圈拆除，用压板将原来在坏线圈上面的那一部分绕组端部轻打，下压留足新线圈面层嵌放的空位，并将留下的绕组整形，然后换上新的槽绝缘，将新线圈嵌入槽内。对双层绕组，趁热打出槽楔，剪断坏线圈两端并迅速拆除，然后补充适当的槽绝缘，用等于铁心长度的薄铁片从槽口中把保留的上层线圈边压到槽底，其面上留出嵌放新线圈的空位，将留下的线圈整形后，放入新的层间绝缘，再将新线圈嵌入槽中。

3. 废弃法

找出接地点后，如果无法进到局部修理，可将该线圈切除，将相邻两线圈跨接串联起

来。所以废弃法又叫跨接修理法。具体做法如图 5-15 所示。

当线圈②内部有匝间短路时，将线圈②端部割断，并分匝包好绝缘，用跨接线把线圈①和③连接起来，废弃法适用于单路星形绕组，一般切除匝数不得超过绕组总匝数的 10%，切除线圈后，电动机的输出功率要降低。对多路星形或三角形接法的绕组，为了保持磁通的平衡，需相应切除其他支路的完好线圈，故不宜采用废弃法。

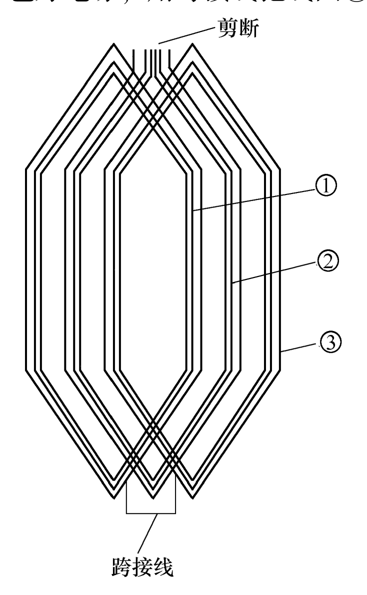


图 5-15　废弃修理

废弃法是一种应急修理方法，事后应采取补救措施，及早将跨接线和故障线圈替换下来重修。

4. 高压线圈接地故障的局部修理

1）取出故障线圈。首先割断线圈端部绑绳，取下垫块，退出故障线圈槽中的槽楔。如果接地点在上层边，只要翻出槽外即可处理，若接地点在下层边，则需要抬出一个节距内的线圈上层边，才能取出故障线圈。取线圈时，先在端部斜边部位穿入几根棉绳或白布带（如直线部分较长，再从径向通风槽穿入棉绳，使中部与两个端部同时受力），然后用电焊机作电源通以 1.5 倍的额定电流加热。当线圈表面温度约 80℃时（手摸略感烫手），立即断电，趁热打出槽楔，用木棒略为抬起上层边，将两端的棉绳移近槽口处，使左、中、右三点同时着力，将线圈边抬出。若仍抬不出，应分析原因，不要猛力硬抬。如果温度不够，应重新加热。注意不使端部产生过大的变形，也不要损坏抬出边的绝缘。

2）修理故障线圈。剥去直线部分的统包绝缘并延伸至端部。在端部，剥去部分 A 和斜坡部分 L，如图 5-16 所示，其中剥去部分 A 取 50～100mm，斜坡部分 L 的长度为

$$L = 10 + \frac{U_N}{200} \ (\text{mm})$$

图 5-16　故障线圈边的绝缘处理

式中　U_N——电动机额定电压（伏）。

检查匝间绝缘完好后，先刷 1410 号云母带漆，再用 5032 号沥青云母带连续半叠包。上、下层对缝要错开，包扎要紧密。如云母带已干，可边包边刷 1410 号漆，包到原来厚度后，最外面半叠包一层白布带。

新绝缘也可用玻璃丝带包扎。先在已抹净的待包处刷一层环氧树脂胶，用 20mm × 0.1mm 无碱玻璃丝带半叠包到原来厚度为止。边包边涂环氧树脂胶，斜坡部分要搭接好，包完后在 90℃下烘烤 4h。

线圈包好绝缘后需按标准进行耐压试验。只处理上层边的线圈，可在直线部分包锡箔纸，导线与铁心同时接地，用反加压法（即高压加于锡箔纸上）进行耐压试验，耐压标准见表 5-8，耐压合格后，表面刷 R11 号沥青气干漆。

3）清扫定子槽和处理其余线圈的表面绝缘，然后按标准进行耐压试验。

表 5-8　局部更换线圈时的交流耐压标准

试验阶段	试验电压/kV	试验阶段	试验电压/kV
除去故障线圈后的其余线圈	$0.75\ (2U_N+1.0)$	备用线圈放入槽内后与旧线圈连接前	$2U_N+1.0$
备用线圈放入槽内前	$2.25U_N+2.0$	全部连接好以后	$1.5U_N$

注：U_N 为电动机额定电压。

4）将修复的线圈（或备用线圈）嵌入槽内，并对它进行耐压试验。

5）嵌入所有抬出槽外的线圈边，打入槽楔，焊好连接线，对全部绕组进行耐压试验，并用电桥测量绕组的直流电阻，三相电阻互差不应超过 2%。

6）包好端头及连接线绝缘，配置端部垫块，扎好绑绳，端部涂漆或喷漆。

第六节　绕组短路故障的检修

一、绕组短路的原因

绕组短路分为相间短路和匝间短路两种。其中相间短路又包括相邻线圈短路及极相组连线间短路。绕组短路严重时，负载情况下电动机根本不能平衡，导致电磁转矩不平衡，使电动机产生振动，发出“嗡嗡”响声。并且，短路匝中流过很大的电流，使绕组迅速发热、冒烟，发出焦臭味，甚至烧坏。

1. 相间短路

相间短路多发生在低压电动机及铁心为未开口槽的高压电动机中，故障部位主要在绕组端部，极相组连线之间或引出线处。造成相间短路的原因为

1）绕组端部的相间绝缘低或槽内层间绝缘放置不当或尺寸偏小，形成极相组间绝缘的薄弱环节，被电场强行击穿而短路。

2）“线鼻子”焊接处绝缘包扎不好，裸露部分积灰受潮引起表面爬电而造成短路。

3）低压电动机极相组连线的绝缘套管损坏，高压电动机烘卷式绝缘的端部蜡带脆裂积灰，从而引起相间绝缘击穿。

2. 匝间短路　匝间短路的主要原因有

1）漆包线的漆膜过薄或存在弱点；

2）嵌线时损伤了匝间绝缘，或抽、安电动机转子时碰破了线圈端部的漆膜；

3）长期高温运行使匝间绝缘老化变质。

二、短路故障的检查

1. 万用表或绝缘电阻表法

将三相绕组的头尾全部拆开，用万用表或绝缘电阻表测量绕组相间电阻，其阻值为零或很小时即为短路相。

2. 电阻法

用电桥（或万用表电阻挡）测量三相绕组的直流电阻，阻值过小的一相绕组可能存在短路。

3. 电流与电压降法

先用电流平衡法找准故障相,其接法如图 5-17 所示,电源变压器 T 可用 36V 行灯变压器或交流电焊机。每相串联一只电流表,通电后记下电流表的读数,电流过大的一相即存在短路。

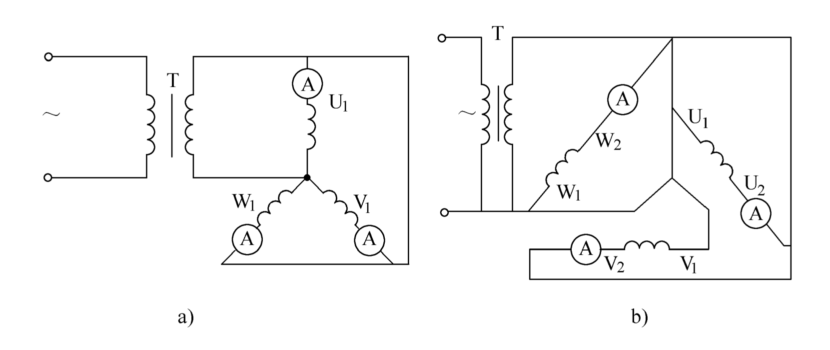


图 5-17　电流平衡法查找短路相

a）星形接法　b）三角形接法

然后将故障相的极相组间连线剥开，并加上 50～100V 交流电压，用万用表测量每个极相组的电压降（见图 5-18a），电压降过小的一组即有匝间短路。再将该组（例如图 5-18b 中 S_1 组）的线圈间连线剥开，用同样方法测量各线圈电压降，便可找到短路点。严重时，短路匝有明显的变色（发黑）现象。

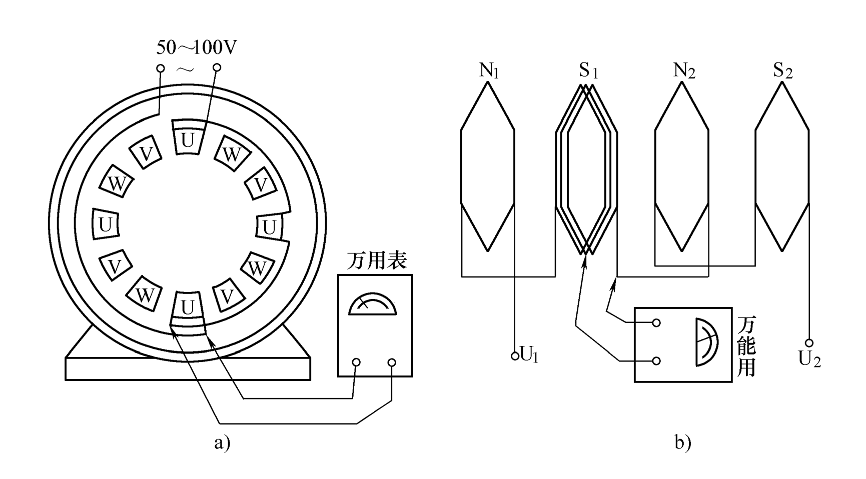


图 5-18　电压降检查法

a）检查短路极相组　b）检查短路线圈

4. 感应电压法

将 12～36V 单相交流电通入 U 相，测量 V、W 相的感应电流；然后通入 V 相，测量 W、U 相的感应电压；再通入 W 相，测量 U、V 相的感应电压。记下测量的数值进行比较，感应电压偏小的一相即有短路。

例如：一台 7.5kW2 极电动机的实测数据见表 5-9，其中 U 相感应电流最小，说明有匝间短路。

表 5-9　实 测 数 据

通电相别	电源电压	感应电压		
		U 相	V 相	W 相
U	24	—	10	10
V	24	7	—	9
W	24	7	9	—

5. 短路侦察器法

短路侦察器由 H 形铁心及励磁线圈构成，其测量原理如图 5-19 所示。将铁心跨放在槽口上，励磁线圈通入交流电，产生磁通 Φ_1 与被测线圈相交链，若线圈有匝间短路，则相当于变压器的二次侧短路，电流表便有较大指示值，短路电流产生的磁通 Φ_2 使薄铁片产生振动，严重时还发生吱吱声。顺次逐槽移动侦察器，便可找到短路槽，对三角形接法或多支路绕组，使用该接法时，均须把并联点拆开，以切断其回路。

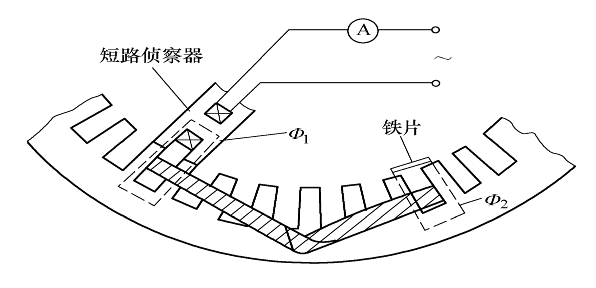


图 5-19　用短路侦察器检查匝间

短路侦察器的铁心弧面与定子内腔相吻合，其技术数据见表 5-10。

表 5-10　短路侦察器技术数据

组合	电　源　侧				感　应　侧			
	铁心截面 /cm²	线径 /mm	匝数	电源电压 /V	铁心截面 /cm²	线径 mm/	匝数	电压表量程 /V
1	6	0. 47	270	36	6	0. 23	2700	0 ~ 50
2	8	0. 47	2068	220	0. 5mm 铁片			

三、短路故障的修理

1. 局部修理

当短路点在槽外且不严重时，可将线圈撬开，在损坏处刷绝缘漆，包绝缘带或垫绝缘物。如短路点在槽内或烧损严重，单独处理损坏匝有困难时，可采用面层嵌线法或废弃法更换整个线圈，其工艺与修理接地故障相同。

2. 穿绕法

绕组仅损坏个别线圈且单根导线较粗时，用穿绕法较为省工省料，还可避免损坏其他好线圈。穿绕修理时，先将绕组加热使绝缘软化，然后将坏线圈的槽楔打击，剪断坏线圈两端，将坏线圈的导线一根一根抽出，接着清理线槽，用一层聚酯薄膜复合青壳纸卷成圆筒，插入槽内形成一个绝缘套。穿线前，在绝缘套内插入钢丝或竹签作为假导线。假导线的线径比导线略粗，根数等于线圈匝数。导线按坏线圈总长（加适当余量）剪断，从中点开始穿线，如图 5-20 所示。导线的一端（左端）从下层边穿起，按上下 1、上 2、下 3、上 4 的次序穿绕，右一端（右端）从上层边穿起，按上 5、下 6、上 7、下 8 的顺序穿绕。穿绕时，

抽出一根假导线，随即穿入一根新导线，以免导线或假导线在槽内发生移动。穿绕完毕，整理好端部，然后进行接线。

3. 高压绕组匝间短路的修理

1）当短路点在上层边时，可抬出槽处进行修理，如故障在下层边，则需抬出一个节距内所有上层边，取下故障线圈修理。

2）按照“接地故障的修理”方法，将故障线圈取下后，先剥去对地绝缘，然后割去导线烧损部分，修光割口并挫成斜坡。斜坡长度 L 等于铜线厚度 b 的两倍，即 $L=2b$，各线匝的接头应互相错开，如图 5-21 所示。

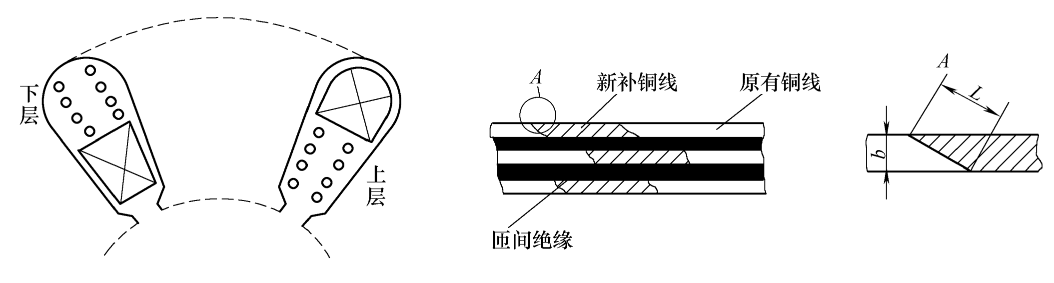


图 5-20　穿绕法修理线圈　　图 5-21　线匝断股修理

3）补接新导线。将新铜线对接处锉好，夹银焊片对接口中间，涂上硼砂焊剂，两端用炭精电极夹紧。合上电源开关，调整好电流，经 5～10s，银焊片熔化，待焊液“打滚”后，断开电源，焊接处呈白色时便可松开电极，修锉焊处，使其表面平整，尺寸与原导线相同。

4）按原来厚度包好匝间绝缘，可用 20mm×0.17mm 醇酸玻璃漆布包扎，也可以塞垫稍宽于导线的绝缘垫条，再用玻璃丝带扎紧，并刷漆烘干。

5）参照“接地故障的修理”工艺包好主绝缘，做耐压试验及进行嵌线等工作。

第七节　绕组断路故障的检修

一、绕组断路的原因

绕组一相断路后，对星形接法的电动机，通电后不能自行起动，断路相电流为零，对三角形接法的电动机，虽能自行起动，但三相电流极不平衡，其中一相电流比另外两相大约大 70%，且转速低于额定值。采用多根并绕或多支路并联绕组的电动机，其中一根导线断线或一条支路断路并不造成一相断路，这时用电桥可测得断股（或断支路）相的电阻较另外两相大。造成绕组断路的主要原因有以下几点：

1）电磁线质量低劣，导线截面有局部缩小处，原设计或修理时导线截面积选择偏小，以及嵌线时刮削或弯拆致伤导线，运行中通过电流时局部发热产生高温而烧断。

2）接头脱焊，多根并绕或多支路并联绕组断股未及时发现，经一段时间运行后发展为一相断路。

3）绕组内部短路或接地故障烧断导线。

二、断路故障的检查

1. 万用表或校验灯法

将三相绕组的头尾全部拆开，用万用表（或绝缘电阻表）测量或用校验灯检查各相绕组，表针不动或灯不亮便是断路相。

2. 电阻法

用电桥测量各相直流电阻，阻值偏大的那一相可能有断股或支路断路，再分组寻找，可查出故障线圈。

3. 电流平衡

接线与图 5-17 相同。电流偏小的一相有断线。

4. 通断试探法

确定断路相后（例如 U 相），还需找出断路点。将电动机极相组连线剥开，用万用表的一根试棒接 U 相首端，另一根依次与每个极相组末端相接，如图 5-22 所示。

假如与第一个极相组末端相接时，万用表指针摆动，而与第二个极相组末端相接时表针不动，则说明第二极相组有断路。逐个进行测试，直至找出所有断路的极相组。

找出断路极相组后，再把它的线圈间连线剥开，然后分别测每个线圈，如图 5-23 所示。如果绕组为多支路并联，还要找出断路点在哪一条支路。

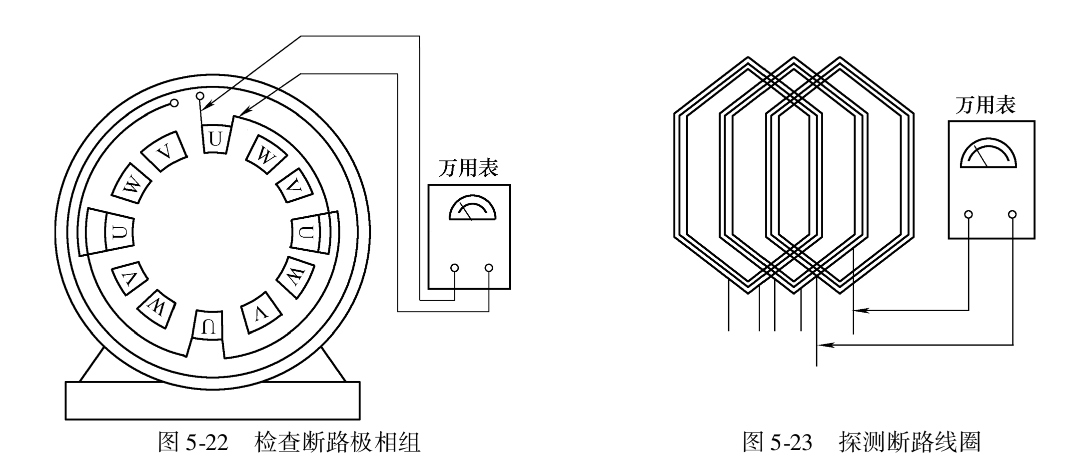


图 5-22　检查断路极相组　　图 5-23　探测断路线圈

三、断路故障的修理

1. 局部补修

断路点在端部接头等处，可将其重新接好焊牢，包好绝缘并刷漆即可，如果导线不够长，可加一小段同线径导线绞接再焊。

2. 穿绕法

面层嵌线法或废弃法，其工艺与前述相同。

第八节　绕组接线错误的检查

一、接线错误的主要类型

1. 极相组或个别线圈接错

这是更换绕组时接线疏忽造成的。少数线圈接反或虽然接线正确，但线圈嵌线时下反了，都会引起三相电流不对称，少极数电动机的极相组接错，则电动机无法起动。极相组接

错，在分数槽电动机中最易发生。在绕制线圈时，将首末端套上不同颜色的套管，可避免接错或一旦接错亦易于查找。

2. 引出线首末端接反

在换接电源线时，由于工作不慎，线头标记错读或不清，使其中一相首末端接反，引出线首末端接反的电动机将不能顺利起动，运行时声响较大且达不到额定转速，三相电流不平衡。

3. 角接电动机错连成星接

原来三角形接法的电动机误接成星形，当接通额定电压后，每相电压将降至原来的$\frac{1}{\sqrt{3}}$。如果电机带着轻负载运行（带额定负载的40%以下），对电动机不仅无损坏，而且电动机的功率因数和频率还能提高，这种运行是允许的。但是，大多数电动机往往带额定负载运行。这种情况会因电动机的转矩下降引起起动困难、运行转速降低、电流过大、电动机过热等不良后果。

4. 星接电动机错连成角接

这种错误接线，使电动机的绕组相电压增至$\sqrt{3}$倍。电动机的绝缘不仅要承受较高的电压，而且，因磁通也要增加，导致铁心磁饱和，空载电流过大。过大的空载电流及过多的磁通会使电动机很快过热，有烧坏的可能，这种错误接法是绝对不允许的。

二、接线错误的检查

发现绕组有接线错误的故障时，首先检查三相绕组首末端及其连接是否正确，其次再检查极相组及其连接。

1. 绕组首末端的检查判别

判别绕组首末端的方法有电磁感应法和盘动转子法。电磁感应法又可分为直流感应法和交流感应法。

（1）直流感应法

首先用万用表找出每相绕组的两个线头，然后按图5-24a所示图形接线。电源一般使用1.5伏干电池，仪表可用万用表毫安挡。

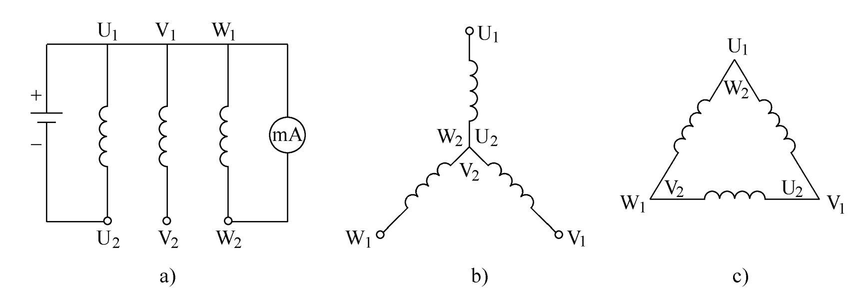


图5-24　三相绕组极性检查及其接线方法

a）极性检查　b）星形接法　c）三角形接法

先将万用表的一端接W_2，用电池负极碰触U_2和V_2，如指针同向偏转，则知U_2和V_2同极性。再将万用表接V_2，用电池负极分别碰触U_2和W_2，看表针偏转方向是相同还是相反。

若相同,便可确定 U_2、V_2、W_2 或 U_1、V_1、W_1 为同极性,即分别为各相的末端或首端,否则相反。各相首末端确定后,便可以按要求接成星形(见图 5-24b)或三角形(见图 5-24c)。

(2) 交流感应法

当绕组有六个出线端时，先将绕组的任意两相串联起来，接交流电压表（万用表交流电压挡）或白炽灯泡，再将第三相接 36V 交流电压（小电动机可直接接交流 220V 电源）。如电压表有指示数值或灯亮，说明两相绕组感应电动势方向相同，即第一相的末端与第二相的首端相连接（见图 5-25a），如果电压表无指示（或指示数值很小）或灯不亮，说明两绕组感应电动势方向相反，相抵消。即两相末端或首端连在一起（见图 5-25b），然后将第一相及第二相的首末端做好标记，用同样方法确定第三相的首末端。

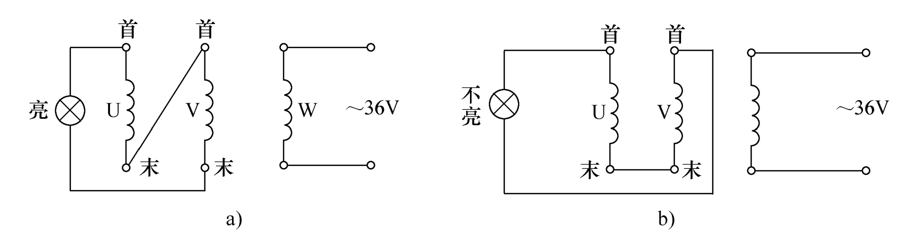


图 5-25 交流感应法检查绕组极性

a）顺向串联 b）反向串联

(3) 盘动转子法

先将三相绕组的两端点分别连在一起，并接上万用表毫安挡，如图 5-26 所示。盘动转子，如万用表指针不动，说明三相绕组的首末端是对的（接在一起的为同极性）；如万用表的指针摆动，则说明三相绕组中有一相头尾接反，再重新接线，再测，直至万用表指针不动为止。

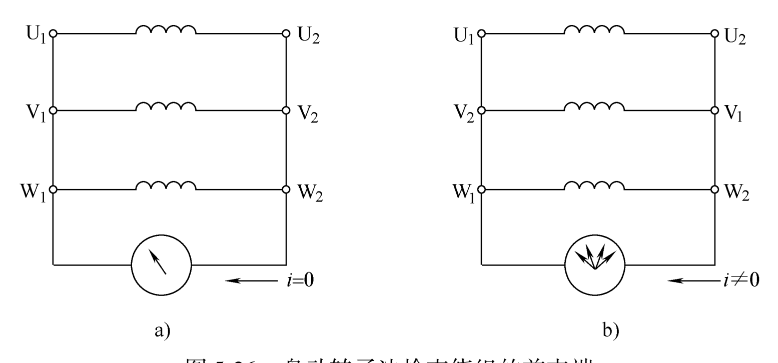


图 5-26 盘动转子法检查绕组的首末端

a）指针不动，接线正确 b）指针摆动，接线错误

2. 极相组或线圈接反的检查

将低压直流电源（如蓄电池）接于某相绕组两端，用磁针沿定子内圆逐槽移动。如接线正确，磁针在经过该相绕组的每一个极相组时，将会反指一次，即在一极相组处指 N，在下一极相组处指 S，如此重复，如图 5-27 所示。若磁针在某个极相组上指向不定，便说明该极相组内有线圈接反，依次对另外两相通电测试，便可找出接错的线圈或极相组。

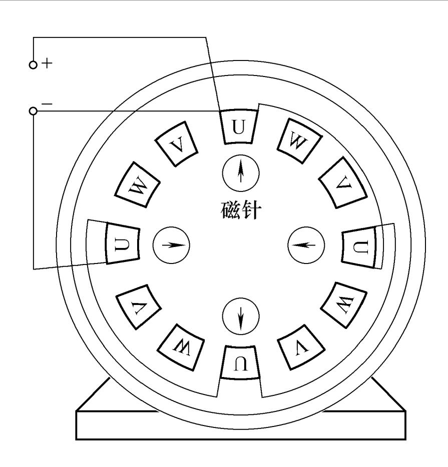


图 5-27　用磁针检查极相组极性

第九节　绕组导线截面及匝数错误的纠正

一、绕组导线截面及匝数错误的原因及后果

每台异步电动机的定子绕组，其导线的截面积（或线径）以及每个线圈的匝数多少都是经过严格设计和计算确定的。修理时，不能擅自改变或有过大的误差。

但是，在更换新绕组时，往往由于疏忽或某些原因（比如原来电动机的槽满率较高，嵌放困难，身边没有合适的导线等），擅自将线径（截面）或匝数加以改变，以求嵌放容易。这是导致导线截面及匝数错误的主要原因。

经常出现这种错误的主要类型有：

1）导线截面没变，而匝数减少，槽满率降低，容易嵌放。

2）导线截面减小，匝数不变，容易嵌放。

3）导线截面增加，匝数减少。

4）导线截面减小，匝数增多。

5）导线截面不但减小，匝数也减少。

定子绕组导线截面（线径）的大小主要是根据电动机的额定电流大小（在电压不变的情况下，根据其额定功率）来确定的，电流大，导线截面大，电流小，导线截面小。为保证额定电流不变（或额定功率），导线截面必须保证足够大。若将导线截面擅自减少，就一定要使电动机的额定功率及电流减少，否则，电动机会过热甚至烧坏。

一般情况下，在保证匝数不变的同时，使用的导线截面不能加大，这样，会增加槽满率，嵌放困难。特殊情况下（如原来电动机的槽满率很低），可适当增加导线截面，对电动机输出功率有好处。

定子绕组的每相串联匝数（及分配到每个线圈匝数）严格地说，是不能改变的。如果匝数减少，将会使电动机的磁通增加，铁心饱和，铁损增加，且电动机空载电流增大很多。严重时，电动机空载时电流就达到或超过额定值，根本不能带负载工作，即使导线截面适当增大，也不能弥补上述的缺陷后果。

在导线截面不变的情况下，线圈的匝数增加，会导致槽满率过高，造成嵌放困难或不能嵌放，导线截面减小，匝数增加，会导致电动机的输出功率降低，这样做不能保证电动机的修复质量。

对绕线式转子绕组，导线截面的减小，会使转子过热，匝数的减少会使电动机的转矩下降，起动困难，带负载的能力下降，这也是不允许的。

二、导线截面和匝数错误的纠正和避免

对已经嵌放完的电动机发现了导线截面或匝数有错误，不妨将电动机在空载下进行测试，若电动机可以空载运行。且空载电流不过大。这种情况下，只能是降低功率使用。修复的电动机必须向用户说明。若空载运行时，空载电流过大，甚至达到或超过额定电流，电动机就只能重修，不能出厂。

对于上述的绕组错误，不能修复。所以一定在更换绕组时避免。避免的办法就是严格选择导线截面，严格按规定的线圈匝数绕制，不能随意改变或马虎从事。这是修理人员必须遵守的原则。

但是，特殊的情况还需特别处理。有时，修理的电动机比较陈旧，特别是铁心锈斑较多，定转子之间的空隙较大等。原来使用时空载电流就较大，现在重换绕组时，如果槽满率允许的话，可适当增加匝数（增加的匝数不能过多）；若槽满率较高，还可以选较细一点的导线，适量增加匝数。这样，重绕后的电动机空载电流会下降，但其额定功率也要下降，这一点必须预先考虑到。

第十节　铁心和机械零部件的修复

一、铁心故障的修复

铁心的常见故障及其原因有：

1）齿部沿轴向外胀。其原因是因为铁心两侧压圈压力不足或磕碰。

2）铁心过热。主要原因是片间绝缘不良使涡流增大所致。

3）局部烧损。主要因为铁心严重接地或定、转子相磨擦（扫膛）。

4）整体松动。因为与机座或支架配合过松、脱焊或定位螺钉松脱等。

铁心的检查和修复：

1. 表面损伤

用锉刀除去突出的毛刺，将连接的硅钢片分开，用刷子蘸汽油洗净表面后，涂上绝缘漆。

2. 齿根烧断

由接地故障引起少量齿根烧断，可将断齿凿掉，清除毛刺，填上绝缘漆，注意不要损坏绕组。

3. 铁心松动

可在机座上另加定位螺钉将铁心固定，或用电焊焊牢。

4. 齿部沿轴向外胀

要及时或尽快修复，否则容易损坏槽绝缘及线圈。用两块钢圆盘，双头螺栓夹紧，使铁心恢复原形。

5. 铁心过热

由于片间漆膜老化或脱落而失去绝缘作用，使涡流损耗增大。经温升试验后再决定是否需要拆开修理。

温升试验采用涡流加热法，其接线可参考第四节铁心损耗干燥法。一般通电 60 ~ 90min，如铁心温度比环境温度高出 45℃或铁心局部温度相差 30℃，就必须拆开铁心重刷绝缘漆或做氧化膜形成处理。

对小型电动机的硅钢片做氧化膜形成处理的工艺过程是：将去净旧漆膜的硅钢片在炉内加热到 550 ~ 580℃，然后通入氧化剂（空气和蒸汽混合物），炉内气体保持 5×10^4 ~ 10×10^4Pa 的压力，经 3 小时左右的保温及氧化，硅钢片两面便可形成一层均匀而具有良好绝缘性能及导热性能的氧化膜。

二、轴承部分故障的检修

在小型电动机中，一般前后均采用滚珠轴承，中型电动机中，传动端采用滚柱轴承，另一端采用滚珠轴承。

滚动轴承的常见故障有过热和异声。轴承在运行过程中超过 95℃，即为过热故障。引起过热的原因，一是轴承装配不当；二是轴承损坏，致使滚珠（或滚柱）与内外圈接触不正常，增大摩擦而发热；三是轴承内圈与轴承配合过松或过紧，以及轴承外圈与端盖轴承孔配合过松或过紧；四是轴承盖内圆偏心或装配不正，也会增大轴承的摩擦损耗；五是润滑油质量不良或添加量过多。

通常，可根据产生的原因，对轴承采取相应措施便可消除。如果轴承间隙过大或本身已损坏，无法修理，只能更换新的同型号合格品。表 5-11 是 Y 系列电动机使用的轴承型号，供查阅。

表 5-11　Y 系列电动机滚动轴承型号及允许振动值

中心高/mm	磁极数	Y（IP23）				Y（IP44）			
		传动端		非传动端		传动端		非传动端	
		型号	振动值/(m/s)	型号	振动值/(m/s)	型号	振动值/(m/s)	型号	振动值/(m/s)
80	2、4					180204z_1	43	180204z_1	43
90	2、4、6					180205z_1	44	180205z_1	44
100	2、4、6					180206z_1	45	180206z_1	45
112	2、4、6					180306z_1	47	180306z_1	47
132	2、4、6、8					180308z_1	51	180308z_1	51
160	2、4、6、8	211z_1 2311z_1	62	211z_1 311z_1	57	309z_1 2309z_1	55 58	309z_1	55
180	2、4、6、8	212z_1 2312z_1	64	212z_1 312z_1	59	311z_1 2311z_1	57 62	311z_1	57
200	2、4、6、8	213z_1 2313z_1	65	213z_1 313z_1	60	312z_1 2312z_1	59 64	312z_1	59
225	2、4、6、8	214z_1 2314z_1	66	214z_1 314z_1	61	313z_1 2313z_1	65	313z_1	60

（续）

中心高/mm	磁极数	Y（IP23）				Y（IP44）			
		传动端		非传动端		传动端		非传动端	
		型号	振动值/(m/s)	型号	振动值/(m/s)	型号	振动值/(m/s)	型号	振动值/(m/s)
250	2、4、6、8	$314z_1$ $2317z_1$	61 68	$314z_1$ $317z_1$	61 64	$314z_1$ $2314z_1$	61 66	$314z_1$	61
280	2、4、6、8	$314z_1$ $2318z_1$	61	$314z_1$ $318z_1$	61	$314z_1$ $2317z_1$	61 68	$314z_1$ $317z_1$	61 68
315	2、4、6、8	$316z_1$ $2319z_1$	69	$316z_1$ $319z_1$	66	$316z_1$ $2319z_1$	69	$316z_1$ $319z_1$	69

新轴承的装配一般采用敲打法或热套法。前者应垫以铜棒或钢管。钢管内径略大于轴径，其壁厚为轴承内圈厚度的2/3或4/5。热套法是将轴承放在干净的机油中加热到100～110℃，经10～15min后取出，立即套到轴上，用工具压住内圈，推压到轴承位置。

三、轴的修理

电动机轴常见的损坏有轴弯曲，轴颈磨损，轴裂纹，局部断裂等。造成轴损坏的原因，除轴本身的材质不好及强度不够外，轴与轴承、联轴节配合过松或有相对运动，频繁的正反转冲击，拆装时过大的机械碰撞，安装轴线不正等也会引起轴的损坏。下面简单介绍对故障的修理方法。

1. 轴弯曲

轴弯曲可在机床上用千分表测出。当弯曲不超过0.2mm时，一般不矫正，仅作适当磨光。如弯曲较大，则需用压力机矫正或将轴加热后用气锤矫正，再进行车光或磨光。

2. 键槽损伤

可先进行电焊，然后车圆重铣键槽，也可采用铣宽键槽的办法，或转过一个角度后另铣键槽。

3. 裂纹或断裂

有裂纹或局部断裂的轴一般应更换新轴。新轴的钢牌号应与旧轴相同（多数为35#或45#钢）。旧轴用压力机压出后再压入新轴，对新轴加工分为两次进行。先车好中间部分，压入铁心；再车轴承位置及轴伸端。加工时要特别注意，保证铁心外圆与两轴承位置的同心度。

若裂纹在轴伸端处，可先打出坡口，用电焊补焊，然后进行精车。补焊时要注意不能变形且有足够的强度。

4. 轴颈磨损

由于轴承内圈与轴颈的配合公盈过小，在运行中发生轴与内圈相对运动，使轴颈磨损而松动（即走内圆）。这时，必须将轴颈补大到原来尺寸。常用的方法有

（1）喷镀或刷镀

利用专门的设备将金属镀在磨损的轴颈上，恢复原来的直径。此法适用于磨损深度不超过0.2mm的场合。

（2）镶套

当轴颈磨损较大或局部烧损发蓝退火时，可将轴颈车圆后镶套。套的材料用30～45#钢，其厚度为2.5～4mm，轴与套之间采用U_8（JB_3）过盈配合，其公差值见表5-12，将套加热装至轴上后，放在车床上加工套的外圆，其配合公差按表5-13选择。

表5-12　轴与套的配合公差

轴标称直径/mm	>6～10	>10～18	>18～30	>30～50	>50～80	>80～120	>120～160	>160～220
套偏差/μm	−28 −50	−33 −60	−41 −81	−60 −100	−87 −148	−124 −198	−170 −253	−210 −308

表5-13　轴与轴承内套配合公差

轴承内径/mm		>6～10	>10～18	>18～30	>30～50	>50～80	>80～120	>120～180
轴偏差/mm	向心轴承	−4 −3	+5 −3	+12 +2	+14 +2	+16 +3	+28 +12	+40 +13
	滚子轴承	—	—	—	+14 +2	+28 +12	+40 +13	+45 +26

（3）补焊

将轴放在带轮转的支架上，用中碳钢焊条（例如T506）进行手工电弧焊，从一端开始，一圈一圈地焊，边焊边转动转子，直至将轴颈补焊完毕。冷却后，放到车床上加工到所需尺寸，加工时，注意校正两轴颈与转子外圆的同心度。

（4）粘接

1）环氧树脂粘接。在6101环氧树脂中，加15%邻苯二甲酸二丁酯搅匀，再加入7%（冬季为8%）乙二胺固化剂搅匀备用。用干净布蘸丙酮将轴颈和轴承内圈抹净，待丙酮挥发后，在轴颈上匀涂一层环氧树脂粘合剂，接着把已加热的轴承套入轴颈上，并将非配合面上的粘合剂擦抹干净。固化后，可组装。要拆卸轴承，可将轴承加热至300℃左右取下，此法宜粘补磨损量不超过0.1mm的轴颈。

2）厌氧胶粘接　先用布蘸汽油粗擦轴颈及轴承内圆，然后用丙酮润湿布进行精擦，彻底清楚污垢，自行晾干。在轴颈及轴承的接合面分别涂上GY—350厌氧胶，涂敷要均匀，厚度适当，然后将轴承套装到轴颈上，固化6小时后即可组装。要加速固化，可加热到45℃左右（可用温度计测量），两小时后可组装使用。对固化后的轴承，加热至150℃便可顺利拆下。

（5）化学涂镀

此法适用于磨损量不大于0.05mm的轴颈。其工艺步骤如下：

1）配置溶液。稀盐酸溶液，按30%盐酸加70%水配成；硫酸铜、锌粉溶液重量比例为硫酸铜（固体）40%；锌粉（屑）4%，水56%。配好后，两种溶液分别装入两只玻璃容器中长期备用。

2）清洗轴颈。先用汽油清洗干净，然后用纱布蘸少许丙酮（或四氯化碳、无水酒精）将轴颈反复擦抹，自行晾干。

3）先将稀盐酸在轴颈上反复涂几次，再把硫酸铜锌粉溶液在其涂几次，这时盐酸与硫酸铜、锌起化学反应，厚度可自行掌握。

四、端盖和机座的修理

三相异步电动机的端盖和机座一般是用生铁铸成的，常发生的故障就是产生裂纹。其原因多为铸造缺陷或过大的振动及敲击所致。端盖的另一种故障是内圆磨损，其原因是内圆与轴承外圈配合较松，在运行中产生相对运动（即轴承走外圆）造成的，电动机频繁的正反转也会加速端盖内圆的磨损。

1. 修补裂缝

（1）焊接

用铸铁焊条或钢焊条补焊。补焊时，需将工件加热到 700～800℃，然后用直流弧焊机进行焊接。焊好后，放到保温炉内逐渐冷却，以消除焊件的内应力，减少变形。焊接机座时，注意保护好精加工面及绕组，不使其被高温与焊渣损伤，补焊后需保持端盖与机座的同心度。

（2）粘接

采用铁锚 101 聚氨酯胶粘接。具体工艺如下：

1）钻止裂孔。用汽油洗净裂纹线，找出始末端，在两端各钻 ϕ3mm 止裂孔一个。

2）开 V 形槽。用凿子沿裂纹线开出 90°V 形槽至止裂孔为止，槽深约为端盖厚度的 40%。

3）清洁沾合面。先用布蘸酒精粗擦 V 形槽（包括四周 30mm 宽）两三遍，然后用丙酮润湿布彻底擦净粘合面并晾干。

4）涂胶。将铁锚 101 胶按甲∶乙＝2∶1 取出，放入玻璃器皿中调匀，然后倒入 V 形槽内，胶液略高出端盖表面，并用塑料铲压平、压实。

5）固化。加热到 100℃，2h 即完全固化。用铲刀、砂布将高于端盖表面的粘接剂磨平，便可装配使用。

2. 修补端盖内圆磨损

端盖轴承室磨损的修补方法如下：

（1）打“麻点”

也叫打“样冲眼”。用高硬度的尖冲头，在内圆周面打出均匀的凹凸点，目的是缩小内圆直径，使它与轴承外圈配合较紧。此法适用于轻微磨损的小型电动机端盖，是一种临时应急办法。

（2）喷镀或刷镀

参阅轴颈的修补。

（3）镶套

将端盖轴承室内圆车大 8～10mm，采用过渡配合的公差，内镶壁厚 6～7mm 的铸铁套，并在结合面处用轴向骑缝螺钉固定，然后放到车床上精车套的内圆，使它与端盖止口同轴，且与轴承外圈获得合适的公差配合。轴承外圈与端盖轴承室配合公差见表 5-14。

表 5-14　轴承外圈与端盖轴承室配合公差

轴承外径/mm	18	>18～30	>30～50	>50～80	>80～120	>120～180	>180～260	>260～360
轴承室偏差/μm	+13 −6	+16 −7	+18 −8	+20 −10	+23 −12	+27 −14	+30 −16	+35 −18

（4）粘结

粘结一般可以解决间隙在0.2mm以内的走外圆问题，并且可以再次拆卸和粘结。

1）用AR—5耐磨胶粘结。先用汽油粗擦轴承外圆及轴承室内圆，然后用丙酮细擦，晾干。将AR—5耐磨胶按甲∶乙=1∶1挤出放在玻璃器皿中调匀，然后在粘接面上来回涂两三次，涂层要均匀，厚度比间隙大0.5~1mm。在室温下固化24h后，按公差要求车至配合尺寸，才可进行装配。

2）用GY—260厌氧胶粘结。其工艺与轴颈粘结相同。

（5）锡焊

用锡焊法修理端盖内圆磨损是一种简单易行的办法，不但坚固耐用，而且可保证与止口的同轴度。操作时，先用汽油彻底清洗轴承及端盖轴承室，用布揩干净，然后在各等分处涂上少许盐酸，用紫铜电烙铁头在其上平整的焊上一层薄锡，再用砂布磨平，清擦干净。将焊好锡的轴承装入轴承室，多余的焊锡会自动脱落下来。该法可修复间隙不大于0.3mm的端盖内圆磨损故障。

第十一节　三相异步电动机转子故障的修复

三相异步电动机的转子有两种型式：笼型和绕线型。本节分别介绍这两种结构型式的转子常见的主要故障及修复方法。

一、笼型转子断条故障的检查和修复

笼型转子又分铜笼和铝笼两种。在实际电动机运行中，笼型转子出现的主要故障就是断条。断条后的电动机，输出功率减小，转速下降，定子电流表针左右摆动。

铜笼断条的原因除了个别铜条存在先天性缺陷外，主要是由于嵌装的铜条在槽内松动，在运行中受电磁力和离心力的交变作用导致疲劳而断裂。另一个原因是铜条与端环的焊接不良而开焊。

铝笼转子是铸铝式的。断条的原因一是制造时浇注不良，导条有气孔、夹渣、收缩等内在缺陷，当通过电流时，引起局部高温而烧断。二是电动机的使用条件恶劣，频繁的正反转及过载运行，使铝条受到机械力的冲击及大电流引起的高温作用而造成断条。

1. 断条的检查方法

（1）铁粉显示法

用电焊机从转子两端环通入低压大电流（150~200A），流过每根铝条中的电流便在其周围产生磁通，将铁粉撒在转子表面，铝条周围的铁心便能吸引铁粉，在导条上形成均匀、整齐的直线排列，如图5-28所示。如果某导条周围吸引铁粉很少，甚至不吸引，便说明该导条已断。

（2）大电流感应法

用高导磁率的钢片或硅钢片做一个门形铁心（截面积6~8cm^2），其上用ϕ0.17mm高强度漆包线绕800~1000匝，并接到万用表的低电压挡，如图5-29所示。从端环通入200~400A交流电（小型电动机电流适当减小），当导条完好时，其电流产生的磁通经门形铁心构成回路，在线圈中感应出电势，万用表便有指示。逐槽移动铁心进行测量，当槽内有断条时，万用表的读数就会减小或等于零。

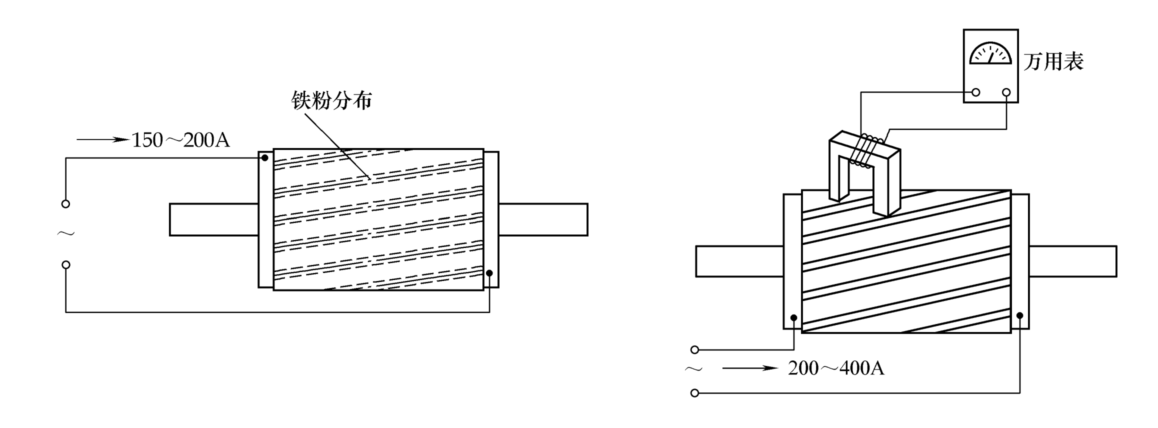


图 5-28　用铁粉检查断条

图 5-29　感应法检查断条

2. 断条的修理

（1）补焊

若断条少，可在断裂处外表面进行补焊。先将铝条断裂处挖大，加热至 450℃左右，用气焊法进行补焊，焊条配方为锡 63%；锌 33%；铝 4%。

（2）换铝条

在铣床上用立式铣刀将断条端部铣一缺口，露出槽孔，用略小于导条直径的深孔钻头（普通钻头接长）沿导条槽钻穿，然后打入与孔径相同的轧制铝条（性能比铸铝好），两端长出端环 5mm，再用氩弧焊或气焊将铝条与端环焊牢。焊好后清理焊渣，做静平衡试验。

（3）换笼

当铸铝转子断条较多，无法补焊及更换铝条时，可用物理或化学的方法将铝笼融化或溶解，然后更换为铜笼。

煤炉熔铝：压出转轴，用夹具将铁心夹紧，倾斜放在煤炉中，加热到 700℃左右（铁心呈粉红色），铝逐渐熔出，取出后清除残铝。

烧碱溶铝：将转子（连轴）垂直放入浓度为 30% 的工业烧碱溶液中，加热至 80～100℃，直到铝全部溶解为止（大约 7～8h），提出用水冲洗铁心。再将铁心放在浓度为 0.25% 的工业冰醋酸溶液内煮沸，水和残碱，然后用水煮沸 1～2h，取出洗净并烘干。

熔（溶）铝后，用占槽面积 70% 的紫铜条，插入槽内并塞紧，两端用铜环焊牢构成新笼。

对修复后的笼型转子，一般要做静平衡试验，待校正后才能装配。

二、绕线式转子的局部检修

1. 绕组的绝缘电阻偏低、接地、短路故障修复

转子绕组与定子绕组一样，也会发生绝缘电阻偏低、接地、短路等故障，其故障原因及局部检修方法与定子绕组相似。但转子绕组是在旋转状态下工作，有的还要正反转运行，所以对它的绝缘要求较高。为了保证绕组的绝缘质量，局部修复后需按表 5-15 的标准进行各

工序的耐压试验。

表 5-15　绕线转子局部更换线圈后的耐压标准

试验阶段	试验电压	
	不可逆的	可逆的
修理后的线圈下槽前	0.85（$2U_2+3000$）	0.85（$4U_2+3000$）
修理后的线圈下槽后	0.85（$2U_2+2000$）	0.85（$4U_2+2000$）
与旧线圈连接后	U_2+750	$2U_2+750$
修理好以后的整个绕组	$1.5U_2$ 但不小于 1000	$3U_2$ 但不小于 2000

注：U_2 为转子额定开路电压。

2. 绕组端部并头套开焊

这是一种由焊接质量不良引起的故障。若肉眼观察不能确定并头套开焊时，可用电桥测量绕组相间电阻。找出阻值偏大的一相或两相，并使电桥准确指零，然后用较软的木板或压层布板逐个地撬一相或两相的并头套，同时观察电桥指针，若撬动某一个并头套时指针偏离零位，则表示该并头套接触不良。

找出并头套脱焊后，采用锡焊料（锡 20%、铅 78.5%、银 1.5%）对脱焊的并头套进行补焊。具体做法是，用松香沫、酒精溶液作焊药，将 300～500W 电烙铁的烙铁头磨成扁平形，使它能插入相邻的两并头套之间，如图 5-30 所示。加热使松香沫熔化后，左手拿锡焊条碰触并头套，与导条的缝隙之间，边加热边加锡，直到填满为止。

在粉尘较多的环境下工作，其并头套必须刷绝缘漆或包扎绝缘带，以减少或防止并头套短路事故。

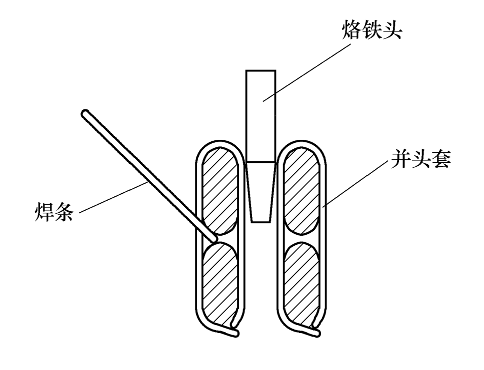


图 5-30　补焊并头套

3. 绑扎钢线的故障检修

绑扎钢线故障常见的有导线与钢线短路和钢线开焊松脱两种。对出现故障处，拆除原来的旧钢线后，目前已普遍采用自粘性无纬玻璃丝带重新绑扎。这种绑扎具有减少端部漏磁，改善电气性能，提高绝缘强度。绑扎工艺简单和节约材料等优点。

常用的聚酯无纬玻璃丝带（B 级绝缘），厚度为 0.17mm，宽度为 15～25mm。绑扎工艺分整形、预热、绑扎、固化四道工序。将转子安放在绑扎机上，用夹具（或木槌）将端部整形。在 80℃下加热 1～2h，通过拉紧装置将无纬玻璃丝带拉至转子，在 45r/min 的速度及 35kg 拉力下进行绑扎。对 100kW 以下的电动机，绑扎厚度为 1～1.5mm（极数少直径大的转子取大值）。绑扎后，在绕组浸漆、烘干过程中进行固化，形成强度高、绝缘好的玻璃钢箍。

对转子直径较小，导线较粗及端部较短的绕组，其端部可用一个等于绕组端部口径的钢圈（包以绝缘）置于端部，用纱带扎牢，再浸漆、烘干。

4. 集电环和电刷常见故障的修理

（1）电刷冒火

引起电刷冒火的原因有三：一是电刷的材质不良，电刷和刷辫接触不良造成；二是集电环磨损严重，直径失圆，环面粗糙，剥离接触不良；三是使用时，电刷选择不当，压力调整

不均匀，长期不清扫等。

（2）短路环接触不良

主要表现为短路环插入深度不够；刀片夹压力偏小，引出线和集电环接触不良，导电杆螺母松动等。

（3）短路环接地短路

主要由于绝缘筒老化，集电环松动，引出线接触不良，导电杆绝缘套损坏，刷握位移等，使绝缘受到机械力及高温破坏，引起集电环局部击穿而接地或短路。其二是由于电动机长期运行，电刷磨损后掉下的碳粉积储在集电环之间，导致环间直接短路。

对集电环发生松动、接地、短路及引出线接触不良等故障，一般经局部修理便可修复。当环上有斑点、刷痕、凹凸不平、烧伤、失圆及剥离等缺陷，可进行一般修理或用车床旋修。如损坏比较严重，无法修复时，则只能更换新集电环。

对电刷的修理包括清扫、研磨、调整压力、更换新电刷或铜辫等。常用电刷的技术数据见表 5-16。

表 5-16　常用电刷技术数据

<table>
<tr><th rowspan="2">型号</th><th rowspan="2">电阻系数
/(Ω·mm²/m)</th><th colspan="2">硬　度</th><th rowspan="2">一对电刷上
的电压降
/V</th><th rowspan="2">电流密度
/（A/cm²）</th><th rowspan="2">允许圆周速度
/（m/s）</th><th rowspan="2">使用时单位
压力
/(gf/cm²)</th></tr>
<tr><th>布氏
/（kgf/mm²）</th><th>洛氏
/（kgf/mm²）</th></tr>
<tr><td>D104</td><td>11</td><td rowspan="4">12</td><td>6.0</td><td>2.5</td><td>12</td><td>40</td><td>150～200</td></tr>
<tr><td>J164</td><td>0.10</td><td></td><td>0.25</td><td>20</td><td>20</td><td>180～230</td></tr>
<tr><td>J201</td><td>3.5</td><td>28</td><td>1.5</td><td>15</td><td>25</td><td>150～200</td></tr>
<tr><td>J204</td><td>0.75</td><td>25</td><td>1.1</td><td>15</td><td>20</td><td>200～250</td></tr>
</table>

第十二节　三相异步电动机定子的重绕和计算

在生产实践和修理电动机时，经常会碰到重换三相异步电动机的定子绕组问题。本节主要对重绕中的方法和计算按不同情况分别予以介绍。

一、正常的定子重绕方法

所谓正常的定子重绕方法是指电动机的铭牌完好，原始绕组依然存在。只需拆除原绕组后换上新绕组即可。这种情况时，必须记录它的铭牌数据，铁心数据，边拆原绕组边记录原绕组数据，制成原始数据记录卡。并将新绕组的绕制和嵌放数据对照记入，存入技术档案中。目的有两个：一是供重绕后的检查试验用；二是供电动机以后的使用检修查阅。重绕时，除必要的改进外，尽可能按原始绕组的数据进行嵌放。主要因为原始绕组的数据是经厂家设计、试制和检验合格的，一般属于最佳数据。这点在实践中非常重要。表 5-17 是三相异步电动机定子绕组重绕记录卡的一种形式，供参考。

二、有铭牌的空壳电动机定子绕组的重绕

当电动机仅铭牌尚在，而定子绕组原始数据丢失时，因为国产系列电动机产品的主要数据是相同或相近的，所以可根据铭牌的型号额定值等数据在有关手册或资料（本书附录）中查阅出同种产品的全部绕组数据。依据这些数据也可进行重绕。

表 5-17　三相异步电动机定子绕组重绕数据记录卡

<table>
<tr><td colspan="4">一、铭牌数据</td></tr>
<tr><td>型号
电流
功率因数
转子电流
制造厂</td><td>功率
接线
运行方式
绝缘等级
产品编号</td><td>频率
转速
暂载率
温升</td><td>电压
效率
转子电压
重量
出厂日期</td></tr>
<tr><td colspan="4">二、铁心数据</td></tr>
<tr><td>定子铁心外径
气隙值
定子槽数</td><td>定子铁心内径
通风槽宽
转子槽数</td><td colspan="2">定子铁心长度
通风槽数
槽形主要尺寸</td></tr>
<tr><td colspan="2">三、定子绕组数据</td><td colspan="2" rowspan="2">重 绕 数 据</td></tr>
<tr><td>名称</td><td>原始数据</td></tr>
<tr><td>绕组形式
线圈节距
导线型号规格
并绕根数
并联支路和接法
每槽导体数
端部尺寸
槽绝缘材料
槽绝缘厚度
槽楔材料尺寸</td><td></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">四、改进措施</td><td colspan="2">重绕日期：　年　月　日</td></tr>
</table>

【例 5-11】 有一台空壳电动机，铭牌上的型号为 JQ2—61—4，额定功率 $P_e = 13\text{kW}$，试确定此电动机定子绕组的数据。

解： 先测出定子铁心数据，定子铁心外径 $D_1 = 28\text{cm}$，内径 $D = 18.2\text{cm}$，定子槽数 $Q_1 = 36$，铁心长度 $L = 15.5\text{cm}$。

查相关手册，JQ2—61—4 电动机定子铁心数据与实际空壳铁心数据一致。得到定子绕组的数据为

双层叠绕式，节距 $y = (1-8)$，每个线圈的匝数 $W_n = 27$，绕制的导线直径为 $1-\phi1.25$，并联支路 $a = 2$，E 级绝缘，绕组为△联结法。

可按上述查得的数据对空壳电动机进行重绕。

三、空壳电动机定子绕组的类比重绕计算

对既无铭牌也无定子绕组数据的空壳电动机，若要进行重嵌绕组，目前计算的方法有多种。这里介绍一种简明使用的计算方法——类比法。

我国多年来，先后生产制造了很多型号的系列电动机，对这些系列电动机的结构和绕组技术数据，在有关手册和资料均有记载。对于电压、转速相同、尺寸相近的电动机，它们的电磁负荷具有接近的数值。据此，对一些无铭牌、无定子绕组数据的空壳电动机，可以查取

相近的系列电动机，按相似原理用比例法来求取该台电动机的绕组数据和功率。其步骤如下：

1）测量空壳电动机的有关数据：定子铁心内径 D（mm），铁心长度 L（mm），铁心轭部高度 h_j（mm），定子铁心的齿宽 b_t（mm），槽数 Q，槽面积 S_c（mm^2）。

2）估算极数：

$$2p = (0.35 \sim 0.4)\frac{Q_1 \cdot b_t}{h_j}(\text{取整偶数})$$

3）按相似原则查国家标准系列型号电动机的数据。例如查阅本书后附录 A，找出型式相同，磁极数相同，定子铁心内径、长度尽可能相近的标准型号电动机作参考，记下它的每个线圈的匝数 W'_n，槽数 Z'，导线直径 d'（mm），容量 P'_e（kW）及铁心内径 D'铁心长度 L'。

4）计算嵌放的绕组中每个线圈匝数 W_n：

$$W_n = \frac{D \cdot L \cdot Q}{D' \cdot L' \cdot Q'} \cdot W'_n$$

5）计算导线直径：

$$d = d'\sqrt{\frac{D \cdot W'_n \cdot Q'}{D' \cdot W_n \cdot Q}}$$

取标准线径。

6）验算槽填充系数：

$$K_T = \frac{N \cdot d^2}{S_c} \tag{5-11}$$

式中 N——每槽导体数（根/槽）。

一般 $K_T = 0.46 \sim 0.48$。计算的 K_T 应在范围内，否则应重选导线。

7）计算电动机的功率：

$$P_e = \frac{d'^2}{d^2}P'_e$$

8）确定绕组数据：按所查取的标准系列电动机数据，确定空壳电动机的绕组形式（单层或双层）接法、支路数、并绕根数。

【例 5-12】 一台封闭式笼型异步电动机，其铭牌及绕组数据丢失，测得定子铁心内径 $D = 95$mm，长度 $L = 112$mm，轭高 $h_j = 77.4mm^2$，齿宽 $b_t = 4$mm，槽数 $Q = 36$，槽的截面积 $S_c = 77.4mm^2$。试将其重嵌上合适的绕组且估算出功率。

解：1）估算极数：

$$2p = (0.35 \sim 0.4)\frac{Q \cdot b_t}{h_j} = (0.35 \sim 0.4)\frac{36 \times 4}{14} = 3.6 \sim 4.1\text{。取 } 2p = 4$$

2）查找国家标准系列电动机和空壳电动机形式相同、尺寸相近的标准型号电动机为 JQ2—22—4、1.5kW。

电动机的数据为定子铁心内径 $D' = 90$mm，长度 $L' = 115$mm，$Q' = 24$ 槽，导线直径 $d' = 0.83$mm，单层链式绕组，每个线圈的匝数 $W'_n = 62$，1 路Y联结，每极 6 槽，节距 $y' = (1 \sim 6)$。

3）计算空壳电动机中每个线圈的匝数：

$$W_n = \frac{D' \cdot L' \cdot Q'}{D \cdot L \cdot Q} \cdot W_n' = \frac{90 \times 115 \times 24}{95 \times 112 \times 36} \times 62 = 40 \text{ 匝}$$

4）计算导线直径：

$$d = d' \cdot \sqrt{\frac{D \cdot W_n' \cdot Q'}{D' \cdot W_n \cdot Q}} = 0.83 \times \sqrt{\frac{95 \times 62 \times 24}{90 \times 40 \times 36}} = 0.87\text{mm}$$

采用标准线径 $\phi 0.86$mm 的高强度漆包线。

5）计算槽的填充系数：

$$K_T = \frac{N \cdot d^2}{S_c} = \frac{40 \times 0.86^2}{77.4} = 0.38$$

得知 K_T 远小于规定范围（0.46～0.48），槽满率偏低。再重选标准线径 $\phi 0.96$mm 的高强度漆包线，这样 $K_T = \frac{N \cdot d^2}{S_c} = \frac{40 \times 0.96^2}{77.4} \approx 0.476$ 符合要求。

6）计算电动机的功率：

$$P_e = P_e' \frac{d^2}{d'^2} = 1.5 \times \frac{0.96^2}{0.83^2} = 2\text{kW}$$

7）确定电动机的数据：对照 JQ2—22—4 型可得，空壳电动机的绕组数据为 $2p=4$，单层绕组，节距 2（1～9），1（1～8），每个线圈匝数 $W_n = 40$（匝），并联支路数 $a=1$，导线为 1 $-\phi 0.96$mm，空壳电动机的额定值为额定功率 $P_e = 2$kW，$U_e = 380$V，Y联结，$f_e = 50$Hz。

四、空壳电动机重绕综合计算法

对一些空壳电动机，在查阅国家标准系列电动机产品中也没有相近的电动机与之比较，这时，对它重嵌定子绕组只有用下面介绍的综合计算法。此方法适用于 50Hz、100kW 以下的低压电动机。

计算过程：

1）测量有关数据。测量定子铁心外径 D_1（cm），内径 D（cm），铁心长度 L（cm），槽数 Z，槽截面积 S_c（cm^2），齿宽 b_t（cm）及铁心轭高度 h_j（cm）。

2）确定电源电压和同步转速。根据要求确定重绕后电动机的电源电压和同步转速（或磁极对数 p）。

3）计算极距：

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}(\text{cm})$$

4）计算每极磁通：

$$\Phi = 0.637 \cdot \tau \cdot L \cdot B_\delta \times 10^{-4} \tag{5-12}$$

式中，B_δ 为气隙磁通密度（T）。按表 5-18 选取。

5）验算轭部磁通密度：

$$B_j = \frac{\Phi}{1.84 \cdot h_j \cdot L} \times 10^4$$

算得的 B_j 值与表 5-18 核对，如相差较大，说明磁极对数 p 不恰当，应重新确定 p 值；如相差不大，可重选 B_δ，使算得的 B_j 值在表 5-18 的范围内。

6）验算齿磁通密度：

$$B_t = \frac{3.4 \cdot p \cdot \Phi}{Q \cdot b_t \cdot L} \times 10^4$$

所得 B_t 值应符合表 5-18 的数值，否则应重选 B_δ，并进行上述计算，使 B_t 值符合要求为止。这时再由公式 $\Phi = 0.637 \cdot \tau \cdot L \cdot B_\delta \times 10^{-4}$（Wb）算得的 Φ 值即为电动机的每极磁通。

表 5-18　异步电动机定子绕组电磁计算参考数据

项　　目		符号	定子铁心外径/cm		
			15～25	25～35	35～45
气隙磁通密度/T		B_δ	0.6～0.7	0.65～0.75	0.7～0.8
齿磁通密度/T		B_t	1.3～1.6	1.4～1.7	1.5～1.8
轭磁通密度/T		B_j	1.1～1.5	1.2～1.5	1.3～1.5
定子绕组电流密度/(A/mm²)	防护式	j_1	5～6	5～5.6	5～5.6
	封闭式	j_1	4.8～5.5	4.2～5.2	3.7～4.2
线负荷/(A/cm)		AS	150～250	250～350	350～450

7）确定线圈节距及绕组系数：

单层绕组采用全节距：

$$y = \tau = \frac{Q}{2p}$$

双层绕组采用短节距，短距比：

$$\beta = \frac{y}{\tau}$$

一般短距比 β 取 0.8。根据短距比及分布系数 K_d（由每极每相槽数决定）。查表 5-19 决定绕组系数 K_W。也可参考第四章第一节计算得到。

表 5-19　双层短距绕组的绕组系数 K_W

每极每相槽数	分布系数（K_d）	短距比(β)					
		0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7
1	1	0.997	0.988	0.972	0.951	0.924	0.891
2	0.966	0.963	0.954	0.939	0.919	0.893	0.861
3	0.960	0.957	0.948	0.933	0.913	0.887	0.855
4	0.958	0.955	0.947	0.931	0.911	0.885	0.854
5～7	0.957	0.954	0.946	0.930	0.910	0.884	0.853

8）计算绕组每相串联匝数：

$$W = \frac{U_\phi}{4.44 \cdot f \cdot K_W \cdot \Phi} \tag{5-13}$$

式中　U_ϕ——相电压（V）；

f——电源频率（Hz）。

9）计算每槽有效导线数：

$$N = \frac{2mW}{Q_1} \tag{5-14}$$

式中　m——相数。

调整 W 和 N 为整数，对单层绕组，N 即为每个线圈的匝数；对双层绕组，则每个线圈的匝数为$\frac{N}{2}$，且 N 必须为偶数。

10）计算导线截面积：

$$S=\frac{S_c K_T}{N} \tag{5-15}$$

式中　S_c——槽的截面积（mm^2）；

K_T——槽内填充系数。采用双纱包圆铜线时 $K_T=0.35\sim0.42$。

采用单纱包漆包线时 $K_T=0.43\sim0.45$；

采用漆包线时 $K_T=0.46\sim0.48$。

当导线截面较大时，可用多根较小的导线并绕，或按表 5-20 采用两条以上的并联支路。这时每根导线的截面积 S'/mm^2 为

$$S'=\frac{S}{na} \tag{5-16}$$

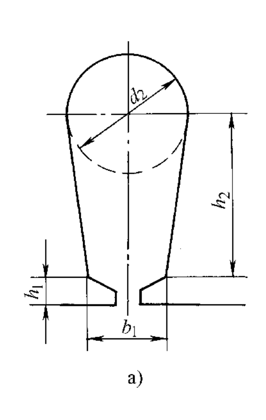
式中　n——并绕导线数，（根）；

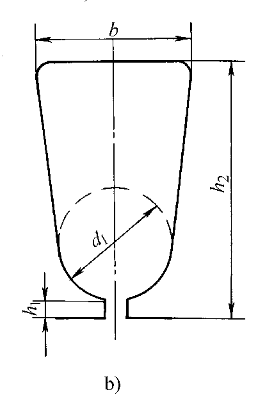
a——并联支路数。

表 5-20　三相绕组的并联支路数

磁极数	2	4	6	8	10	12
支路数	1,2	1,2,4	1,2,3,6	1,2,4,8	1,2,5,10	1,2,3,4,6,12

常见的槽形各部分尺寸如图 5-31 所示，槽的截面积 S_c/mm^2 分别按下列公式计算。





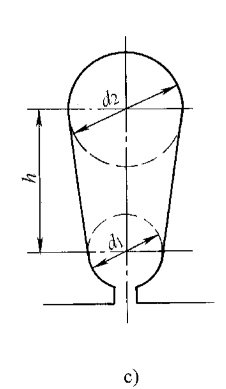


图 5-31　定子铁心槽形及部分尺寸

①圆底斜顶槽：

$$S_c=\frac{d_2+b_1}{2}(h_2+h_1)+\frac{\pi\cdot d_2{}^2}{8}$$

②平底圆顶槽：

$$S_c=\frac{b+d_1}{2}[h_2-(h_1+0.5d_1)]+\frac{\pi\cdot d_1{}^2}{8}$$

③圆底圆顶槽：

$$S_c = \frac{h(d_1 + d_2)}{2} + \frac{\pi(d_1^2 + d_2^2)}{8}$$

11）计算裸导线直径：

$$d = 1.13\sqrt{S'}$$

12）计算每根导线的电流：

$$I_n = S'j$$

式中　j——电流密度（A/mm^2），其值按表 5-18 选取。

相电流：$I_\phi = n \cdot a \cdot I_n$

13）验算线负荷：

$$AS = \frac{I_n \cdot N \cdot a \cdot n \cdot Q}{\pi \cdot D_1}$$

其值应符合表 5-18，否则必须重新选 j。

14）计算电动机的额定功率：

$$P_e = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \eta \cdot \cos\varphi \times 10^{-3} \tag{5-17}$$

式中　η——电动机的效率；

$\cos\varphi$——电动机的功率因数；分别在表 5-21 查取。

表 5-21　中小型三相异步电动机功率因数 $\cos\varphi$ 和效率 η

功率	2 极		4 极		6 极		8 极	
	η%	$\cos\varphi$	η%	$\cos\varphi$	η%	$\cos\varphi$	η%	$\cos\varphi$
10kW 以下	76 ~ 86	0.85 ~ 0.88	74 ~ 86	0.76 ~ 0.88	70 ~ 85	0.68 ~ 0.80	68 ~ 85	0.65 ~ 0.71
10 ~ 30kW	87 ~ 89	0.88 ~ 0.9	86 ~ 89	0.87 ~ 0.88	86 ~ 89	0.81 ~ 0.85	86 ~ 88	0.78 ~ 0.83
30 ~ 100kW	90 ~ 92	0.91 ~ 0.92	90 ~ 92	0.88 ~ 0.90	90 ~ 92	0.86 ~ 0.89	89 ~ 91	0.82 ~ 0.84

【例 5-13】　一台防护式笼型异步电动机，其铭牌及绕组数据丢失。测得定子铁心有关数据如下：外径 $D_1 = 36.8$cm，内径 $D = 23$cm，长度 $L = 13.5$cm，齿宽 $b_t = 1.1$cm，槽数 $Q = 36$。圆底圆顶槽，槽形尺寸 $d_1 = 9.4$mm，$d_2 = 13.6$mm，$h = 23.5$mm（参看图 5-31）。求定子绕组数据及电动机的功率。

解：1）确定电源电压和同步转速。电源电压为三相线电压 380V，同步转速为：$2p = 4$。

2）计算极距：

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3.14 \times 23}{4} = 18\text{cm}$$

3）计算每极磁通。根据铁心外径 $D_1 = 368$mm，查表 5-18 取 $B_\delta = 0.8$T，则每极磁通：

$$\Phi = 0.637 \cdot \tau \cdot L \cdot B_\delta \times 10^{-4} = 0.637 \times 10 \times 13.5 \times 0.8 \times 10^{-4} = 1.24 \times 10^{-2}\text{Wb}$$

4）验算轭部磁通密度：

$$B_j = \frac{\Phi}{1.84 \cdot h_j \cdot L} \times 10^4 = \frac{1.24 \times 10^{-2}}{1.84 \times 3.4 \times 13.5} \times 10^4 = 1.47\text{T}$$

B_j 值符合表 5-18 的范围。

5）验算齿磁通密度：

$$B_t=\frac{3.4\cdot p\cdot \Phi}{Q\cdot b_t\cdot L}\times 10^4=\frac{3.4\times 2\times 1.24\times 10^{-2}}{36\times 1.1\times 13.5}\times 10^4=1.58\text{T}$$

B_t 值也在表 5-18 的范围内。所以将磁通 $\Phi=1.24\times 10^{-2}$Wb 作为计算绕组的依据。

6）确定线圈节距及绕组系数：采用双层叠绕组，短节距。取短节距比 $\beta=0.8$，则线圈节距：

$$y=\beta\frac{Q}{2p}=0.8\times\frac{36}{4}=7.2\text{，取 }y=7\text{。}$$

即线圈节距为(1—8)，每极每相槽数：

$$q=\frac{Q}{2p\cdot m}=\frac{36}{4\times 3}=3$$

查表 5-19 得绕组系数 $K_W=0.913$。

7）计算绕组每相串联匝数，采用△联结，$U_\phi=380$V。

$$W=\frac{U_\phi}{4.44\cdot f\cdot K_W\cdot \Phi}=\frac{380}{4.44\times 50\times 0.913\times 1.24\times 10^{-2}}=151\text{ 匝/相}$$

8）计算每槽有效导线数：

$$N=\frac{2\cdot m\cdot W}{Q_1}=\frac{2\times 3\times 151}{36}=25\text{（根/槽）}$$

取偶数，$N=24$ 根/槽，即每个线圈 12 匝。

9）计算导线截面积（用高强度漆包圆铜线）：

$$S=\frac{S_c\cdot K_T}{N}=\frac{K_T}{N}\left[\frac{h\cdot(d_1+d_2)}{2}+\frac{\pi\cdot(d_1{}^2+d_2{}^2)}{8}\right]$$

$$=\frac{0.46}{24}\times\left[\frac{23.5\times(9.4+13.6)}{2}+\frac{3.14\times(9.4^2+13.6^2)}{8}\right]=7.24\text{mm}^2$$

单根导线截面积较大，故用两根并绕，两条支路并联，则每根导线截面积：

$$S'=\frac{S}{n\cdot a}=\frac{7.24}{2\times 2}=1.8\text{mm}^2$$

10）计算导线直径：

$$d=1.13\sqrt{S'}=1.13\times\sqrt{1.8}=1.52\text{mm}$$

取标准直径为 $\phi 1.50$mm，相应导线截面 $S'=1.76\text{mm}^2$，由于采用两路并联，故每个线圈应为 24 匝。

11）计算每根导线电流：

$$I_n=S'j=1.76\times 5=8.8\text{A}$$

相电流：$I_\phi=naI_n=2\times 2\times 8.8=35$A

12）验算线负荷：

$$AS=\frac{I_n NanQ}{\pi\cdot D}=\frac{8.8\times 24\times 2\times 2\times 36}{3.14\times 23}=421\text{A/cm}$$

结果符合表 5-18 的范围。

13）电动机功率：电动机线电流 $I_N=\sqrt{3}I_\phi=1.73\times 35=60.5$A，估计电动机功率为 30kW，查表 5-21 得 $\eta=89\%$，$\cos\varphi=0.88$，电动机功率：

$$P_e=3\cdot U_\phi I_\phi\eta\cos\varphi\times 10^{-3}=3\times 380\times 35\times 0.89\times 0.88\times 10^{-3}\approx 31\text{kW}$$

14）计算结果：该台电动机主要使用数据：额定功率 $P_e=31\text{kW}$；额定电压 $U_e=380\text{V}$；额定电流 $I_e=60.5\text{A}$；绕组接法为△联结；极数 $2p=4$。电动机的绕组数据：双层迭绕组；线圈节距 $y=7(1\sim8)$，每个线圈匝数为24；两路并联；导线为 $2-\phi1.5\text{mm}$ 高强度漆包圆铜线。

第十三节　绕组的导线及替代计算

电动机定、转子绕组中，导线的直径大小，线圈的匝数，以及绕组的连接方式，是其最主要的参数，它们直接影响着电动机的电磁性能。因此，在重换绕组时，一定要保持原来设计的数据，不能随意改变。但是，在实际中往往遇到下列情况：一是重换绕组时，身边没有所需线径的导线；二是对重绕计算出的导线太粗或是过细，造成嵌放困难等。此时，若要用其他线径的电磁线替代。在保证原来电动机电磁性能不变的原则下，必须进行必要的计算和改进。本节介绍常见的几种代替方法。

一、导线的并绕替代计算

若原来的导线太粗（对软绕组导线直径不宜超过1.6mm）或原导线找不到，可以用另外线径的导线并绕来代替。替代的原则是，在绕组原来的形式、接法和线圈匝数不变的情况下，替代前后的导线截面积要相等或近似相等。即

$$n'S'=nS \tag{5-18}$$

式中　n'——替代后的导线并绕根数；

n——替代前的导线并绕根数；

S'——替代后的导线截面积（mm^2）；

S——替代前的导线截面积（mm^2）。

这样代用导线的截面积 S' 为

$$S'=\frac{n}{n'}S$$

对圆铜线可以换算为

$$d'=\sqrt{\frac{n}{n'}}d \tag{5-19}$$

式中　d'——替换后裸导线的直径（mm）；

d——原来裸导线的直径（mm）。

对上两式计算的导线直径或截面积可查线规表或用下式转换：

$$d'=1.13\sqrt{S'} \text{或} S'=0.785d'^2$$

【例5-14】　一台电动机重绕计算所得导线截面积为5.15mm^2，查出的线规：若用一根，其直径 $d=2.56\text{mm}$，显然导线太粗。

若改为两根并绕，则：

$$S'=\frac{n}{n'}S=\frac{1}{2}\times5.15=2.575\text{mm}^2$$

查得线规为 $d'=1.81\text{mm}$，用 $2—\phi1.81\text{mm}$ 代替。

但仍然感到导线较粗，若改为三根并绕，即：

$$S''=\frac{n}{n''}S=\frac{1}{3}\times 5.15=1.717\text{mm}^2$$

查得接近的线规：$d''=1.50\text{mm}$，（$S''=1.767\text{mm}^2$）

用 $3-\phi1.50\text{mm}$ 替代，总截面为 $1.767\times3=5.3\text{mm}^2$。

如果槽满率允许的情况下，用3—ϕ1.50 并绕替代比较合适。

二、改变并联支路数替代计算

当导线的并绕根数太多时，不容易使线圈绕制平整，给嵌线带来困难，或改变并绕根数比较困难，此时也可通过改变绕组的并联支路 a 来实现导体的替代。

改变并联支路 a 与改变并绕根数 n，其本质是一样的。例如，单根导线接成 2 路和两根同样的导线并绕接为一路，情况是完全一样的。

改变并联支路来实现导线的替代原则仍然是使改变前后的导线总截面积不变。这样，如果保持原有并绕根数不变，则有

$$a'S'=aS$$

若支路数和并绕根数都需要改变时，则有

$$a'n'S'=anS$$

所以：$S'=\frac{an}{a'n'}S$

替代导线的直径为

$$d'=\sqrt{\frac{an}{a'n'}}\cdot d \tag{5-20}$$

式中　a、n、d——改变前的并联支路数、并绕根数和线径。

a'、n'、d'——改变后的并联支路数、并绕根数和线径。

在改变绕组支路时，必须注意两点：

1）若并联支路数由 a 变到 a'，同时要按下式来改变每个线圈的匝数。即

$$W_n'=\frac{a'}{a}W_n \tag{5-21}$$

式中　W_n'——并联支路数改变为 a'时的每线圈匝数；

W_n——并联支路为 a 时的每线圈匝数。

2）并联支路数不能取任意值。例如 4 极 36 槽电动机，双层绕组的支路数只能有 1、2、4，而单层绕组的支路数只有 1 和 2 两种。

【例 5-15】　一台 40kW，72 槽 6 极电动机，嵌放双层叠绕组，计算出一根导线一路接线，导线截面为 10mm^2，每个线圈匝数为 4 匝。截面 10mm^2 的导线直径为 3.57mm。导线太粗，试用较合适的导线替代。

解：对 6 极电动机双层绕组的并联支路，可接成 1、2、3、6 路，选择方案一：选 3 根相同直径的导线并绕，绕组并联支路为 2。

这样：$S_1'=\frac{an}{a_1'n_1'}S=\frac{1\times1}{2\times3}\times10=1.667\text{mm}^2$

选电磁线 $d_1=1.45\text{mm}$（$S_1=1.651\text{mm}^2$）

每圈匝数：$W_{n1}'=\frac{a_1'}{a}W_n=\frac{2}{1}\times4=8$ 匝。

结论：用3 − ϕ1.45mm 导线，2 路并联，每圈匝数为 8 匝，双层叠绕组，接成 6 极电动机。

选择方案二：选 2 根相同直径的导线并绕，绕组并联支路为 3。

这样，$S_2' = \dfrac{an}{a_2'n_2'}S = \dfrac{1 \times 1}{3 \times 2} \times 10 = 1.667\text{mm}^2$

选电磁线 $d_2 = 1.45\text{mm}$（$S_2 = 1.651\text{mm}^2$）

每圈匝数 $W_{n2}' = \dfrac{a_2'}{a}W_n = \dfrac{3}{1} \times 4 = 12$ 匝

结论：用2 − ϕ1.45mm 导线，3 路并联，每圈匝数为 12 匝，双层叠绕组，接成 6 极电动机。

选择方案三：用 1 根导线，选 6 路并联，

这样，$S_3' = \dfrac{an}{a_3'n_3'}S = \dfrac{1 \times 1}{6 \times 1} \times 10 = 1.667\text{mm}^2$

选电磁线 $d_3 = 1.45\text{mm}$（$S_3 = 1.651\text{mm}^2$）

每圈匝数 $W_{n3}' = \dfrac{a_3'}{a} \cdot W_n = \dfrac{6}{1} \times 4 = 24$ 匝

结论：用1 − ϕ1.45mm 导线，6 路并联，每圈匝数为 24 匝，双层叠绕组，接成 6 极电动机。

以上三个方案的绕组均使电动机性能相同，实际操作时任选哪一种均可。国家标准系列电动机采用的是第二方案。

三、改变绕组接线方式替代计算

三相异步电动机的定子绕组可以接成△联结，也可以接为Y联结。但电动机适用的电压就不同了。恰恰利用这个特点，可改变接法来解决导线的替代问题。

在电源频率一定的情况下电动机的每相串联匝数与其所加的相电压成正比。当电动机为△联结时，每相绕组承受的是线电压 $U_{线}$，每相的匝数为 $W_{\triangle}$，若电机为Y联结时，每相绕组承受的是相电压 $U_{\phi} = \dfrac{1}{\sqrt{3}}U_{线}$，这样每相的匝数 $W_{Y} = \dfrac{1}{\sqrt{3}}W_{\triangle}$，这才使电动机的磁通保持不变。所以，若原电动机绕组为△联结，重绕时，将其改为Y联结，若还在原来电源电压下工作，必须改为每个线圈的匝数：

$$W_{nY} = \frac{1}{\sqrt{3}}W_{n\triangle}$$

如果还要保持改接后的功率不变 $U_{\phi \cdot Y} = \dfrac{1}{\sqrt{3}}U_{\phi \cdot \triangle}$，则电流 $I_{\phi \cdot Y} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi \cdot \triangle}$。这样导线截面积应与相电流成正比，所以：

$$S_{Y} = \sqrt{3}S_{\triangle} = 1.732S_{\triangle} \tag{5-22}$$

即导线直径：$d_{Y} = \sqrt{1.732}d_{\triangle}$

式中　S_{Y}——Y联结的导线截面积（mm^2）；

$S_{\triangle}$——△联结时导线截面积（mm^2）；

d_{Y}——Y联结时导线直径（mm）；

$d_{\triangle}$——△联结时导线直径（mm）。

反过来，如果原来电动机为Y联结，重绕时改为△联结。在同样电源电压下，相电压增大到$\sqrt{3}$倍，此时每圈的匝数也要增加到$\sqrt{3}$倍。即

$$W_{n\triangle}=\sqrt{3}W_{nY}=1.73W_{nY}$$

要求电动机的功率不变，则：

$$S_{\triangle}=\frac{1}{\sqrt{3}}S_{Y}=0.58S_{Y}$$

$$d_{\triangle}=\frac{1}{\sqrt{1.732}}\cdot d_{Y}=0.76d_{Y}$$

根据上述关系式，可通过改变接线方式达到导线的替代。

【例 5-16】　一台需要重绕定子绕组的三相异步电动机，原绕组为一路Y联结，双层绕组，每个线圈匝数 $W_{nY}=12$ 匝，使用的导线直径 $d_{Y}=1.5$mm，一根绕制。因身边无这种规格的导线，请改用其他规格的导线来替代。

解：方案一：采用 2 根相同直径的导线并绕，则每根导体的截面积为：

$$S'_{Y}=\frac{n}{n'}S_{Y}=\frac{1}{2}\times1.767=0.8835\text{mm}^2$$

查得这种导线直径为 $\phi1.08$mm。

用 2 根并绕，总截面积为 1.832mm^2。

方案二：将原来Y联结改为△联结，这样导体的截面积则为

$$S_{\triangle}=0.58S_{Y}=0.58\times1.767=1.025\text{mm}^2$$

查表得：选 $\phi1.16$mm 导线，截面积为 1.057mm^2。同时每个线圈匝数要改为

$$W_{n\triangle}=1.73W_{nY}=1.73\times12=21(\text{匝})$$

以上两个方案使用了两种规格的导线，在实际中视情况来选择，方案二的选取一定在铭牌上，同时将原来的Y联结改成△联结。

以上介绍的三种导线替代方法，在实际中可以综合使用，即：并绕根数、并联支路和接法，同时改变或其中两者同时改变，即可以多一些导线替代方法。

【例 5-17】　一台旧式电动机 20kW，原来用 $1-\phi2.1$mm，两路并联的双层叠绕组，每个线圈为 9 匝，Y联结 380V，现重新更换绕组。因需要Y-△减压起动，改接为△联结。怎样绕制？

解：方案一：原来的电动机用的纱包线，现改用高强度漆包线，槽满率可能低。在选择导线时，为提高效率，导线的标准直径比计算值要稍大较妥当。

只改变接法，其他不变，则

$$d_{\triangle}=0.76d_{Y}=0.76\times2.1=1.596\text{mm}$$

选标准线径：用 $\phi1.62$mm 一根绕制。

每个线圈匝数：$W_{n\triangle}=\sqrt{3}W_{nY}=1.732\times9=16$ 匝。即用 $1-\phi1.62$mm，每圈匝数 16 匝，双层叠绕组，2 路并联△联结，进行绕制和嵌放。

方案二：将方案一采用的 $1-\phi1.62$mm 导线改为 2 根并绕，其他不变，即

$$S_{n\text{I}}=2.06\text{mm}^2$$

改为 $S_{n\mathrm{II}}=S_{n\mathrm{I}}\dfrac{a}{a'}=2.06\times\dfrac{1}{2}=1.03\mathrm{mm}^2$

查表，用 $\phi1.16$mm（$S_{n\mathrm{II}}=1.057$mm）2 根并绕代替。

即用 2 - $\phi1.16$mm，每圈匝数为 16 匝，双层叠绕组 2 路并联，△联结进行绕制和嵌放。

方案三：将方案一中的 2 路并联改为 3 路并联，1 根绕制时，导线截面改为

$$S_{n\mathrm{III}}=\frac{an}{a'n'}S_{n\mathrm{I}}=\frac{2\times1}{3\times1}\times2.06=1.373\mathrm{mm}^2$$

查表，用 1 - $\phi1.35$mm（$S'_{\mathrm{III}}=1.431\mathrm{mm}^2$）1 根绕制，

每圈匝数改为 $$W_{n\mathrm{III}}=\frac{a'}{a}W_n=\frac{3}{2}\times16=24\text{ 匝}$$

即，用 1 - $\phi1.35$mm 导线，每圈匝数为 24 匝，双层叠绕组 3 路并联，△联结进行绕制和嵌放。

第十四节　三相异步电动机定子绕组的嵌绕工艺

对 100kW 以下的三相异步电动机，其定子绕组多数用高强度漆包圆铜线制成的。因为绕组柔软、韧性好，嵌放在铁心槽内比较容易。常称此类绕组为软绕组（或散嵌绕组）。对定子软绕组的嵌绕实际操作主要分线圈的绕制、线圈的嵌放、线圈的接线及整形四个主要环节。本节对这四个环节的操作工艺作一简单介绍，供读者在实践中参考。

一、绕组的绕制

绕组线圈的绕制看起来很简单，但是线圈绕制的好坏和正确与否直接关系到下一步嵌放过程的顺利进行与否，也直接影响着电动机的性能。例如，线圈尺寸过小，嵌放起来就困难或根本不能嵌放，但尺寸过大，增加了绕组的阻抗，浪费了铜线，还影响到电动机的装配。所以线圈的绕制一定要仔细和认真。这里重点要强调几点：

1. 绕线模的选择和制作

绕线模一般是由模心和左右两夹板组成的，如图 5-32 所示。模心是其主要部分，它决定着线圈的形状和尺寸。模心的形状选择如图 5-33 所示。其中，菱形端线模多用在双层绕组；等距圆形端线模用在单层链式绕组；不等距圆形端线模用在单层交叉式绕组；塔形线模用于同心式绕组。

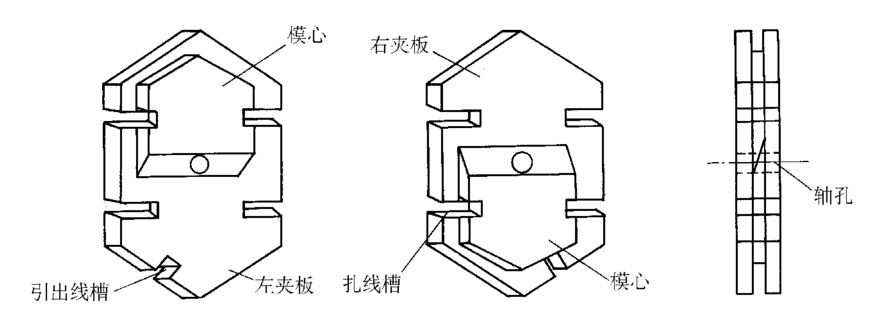


图 5-32　绕线模结构

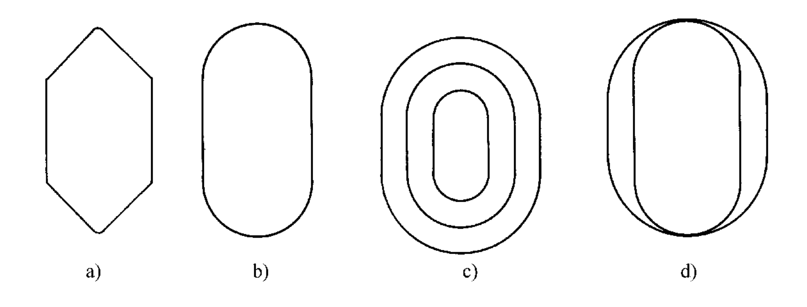


图 5-33　绕线模模心形状举例

确定绕线模模心尺寸有 4 种方法：

1）对标准系列电动机，其绕线模尺寸在该电动机的技术数据中可以查到。

2）根据铁心的实测数据和绕组形式计算绕组绕线模的尺寸（本书不再叙述），但根据计算制成的绕线模必须先试制一个线圈，嵌到槽中，按实际情况对绕线模修改。

3）修理电动机过程中，在拆除旧绕组时，注意拆下一个完整的原线圈，取其中最小的一匝，参考它的形状和尺寸（周长）选择或制作线模模心。

4）对空壳电动机，可用一根导线按规定的节距放入槽内形成一个线圈，特别注意端部尺寸一定要合适，以这个线圈为准来选择或制成模心。

在修理电动机时，因为遇到的电动机型号、大小不同，可以做一个可以调节模型尺寸的活络绕线模，活络绕线模的制作可查有关资料，本书不再叙述。

2. 漆包线的选择和质量要求检查

线圈绕制前一定对所绕的电磁线质量要求和尺寸进行检查。电动机所使用的电磁线有不同的型号、规格和耐热等级，可在有关手册或本书后附录中查到，检查所绕导线项目主要有漆包线的型号、耐热等级、导线的直径是否符合电动机的要求、所绕的漆包线表面是否光滑清洁，不应有气泡和杂质、漆膜不应有起皮或脱落，导线的粗细是否均匀等。

3. 线圈的绕制一般在绕线机上进行，绕制时要注意几点：要求线圈匝数准确，排列整齐；绕线机的速度要适中，不能过快；导线的拉力不能过大，防止导线拉细或拉断；中途断线，应将接头留在线圈端部斜边位置，不应在直线部分或鼻端有接头；线圈的首端和尾端要留有适当的长度，一般留有半匝长度为宜；绕好的线圈在其内侧直线部分用纸（线）绳捆扎好。线圈绕制的整齐度松散度等质量，直接影响着嵌放的难度和质量，决不能忽视。

二、线圈的嵌放

1. 线圈嵌放前的准备

绕制好的线圈嵌放在铁心槽中之前，一定要做好以下准备。

（1）铁心的清理

对新铁心一定要将槽内的油污和杂物清理干净，槽内一定要平整光滑，对个别的突出铁心片一定要锉平，槽口处不能有突出的尖锐铁心片，以防划破绝缘，槽的两端也不能有张开的铁心片。对旧铁心除清扫槽内的残留污渣外，还要检查铁心上是否有铁心片的突出部分，保持平整光洁，防止铁心刺伤绝缘。

（2）槽内绝缘的裁剪、放置和准备

绕组的绝缘包括槽内的对地绝缘，层间绝缘（双层绕组）和相间绝缘（端部相间绝缘），此外还有起锁紧槽内导线作用的槽楔，接线处的绝缘套管。绑扎用的绝缘绑带等。所有这些绝缘材料是保证电动机质量的一个重要因素，这些绝缘材料必须符合电动机的耐热等级，有足够的耐压强度。在嵌放绕组前，首先必须将所需绝缘材料选择好。根据电动机要求，查有关手册或本书后附录，查出各种绝缘的名称型号、耐压等级。表 5-22 列出不同绝缘等级的槽绝缘材料，供读者实践中参考。

表 5-22　不同绝缘等级的槽绝缘材料

型号	机座号	绝缘等级	材　料	总厚度/mm	伸出铁心长度/mm
Y	80 ~ 112	B	0. 30 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔（DMD，DMDM）	0. 3	7. 5 ~ 10
Y	132 ~ 180	B	0. 35 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔（DMD，DMDM）	0. 35	7. 5 ~ 10
Y	200 ~ 280	B	0. 45 聚酯纤维聚酯薄膜复合箔（DMD，DMDM）	0. 45	10 ~ 15

电动机使用的槽楔一般分竹楔和胶木楔，后者的绝缘及机械强度比前者好，但成本较高。槽楔的斜面为梯形，长度比槽绝缘长度短 3 ~ 5mm，两端磨角，紧度适宜，与绝缘相接触的表面应光洁，以防打入槽内时损伤绝缘。

端部相间绝缘和层间绝缘裁剪好，待嵌放绕组时边嵌线边使用，槽内绝缘（对地绝缘）裁剪后，放入槽内。

（3）嵌放绕组的工具准备

嵌线工具主要有压线板（俗称线压子）、理线板、剪刀、手锤、尖嘴钳等。

2. 嵌放绕组的要点

绕组线圈嵌放在槽内，目前主要靠手工进行。人工嵌放绕组的经验、手法的操作巧妙程度，直接影响绕组的嵌放质量。这里仅提出几个要点，提醒操作者注意：

1）操作人员对所嵌电动机绕组的形式、三相绕组的安排关系以及线圈的节距必须清楚，否则容易出现嵌放错误。

2）绕组在槽内及槽两端排列整齐，特别在槽内不能有交叉，否则容易使绕组因挤压造成匝间短路。

3）对槽满率较高的绕组不能用压线板强行挤压，只能使导线顺序放入槽内。

4）嵌放绕组时，对槽绝缘不能划伤、挤破，特别对槽两端绝缘伸出端和槽口绝缘纸更应注意。

5）绕组在槽两端的伸出部分尽可能相同，且美观整齐。

6）对放置的端部相间绝缘位置一定要准确，槽内的层间绝缘一定要使同槽的两线圈边彻底隔开。

三、线圈的接线和整形包扎

正确接线是保证电动机正常工作的必要条件。对接线复杂的绕组一定要认真按工艺步骤进行。

1）首先必须弄清楚绕组的并联支路数，各极相组之间的联接关系及相间的接线方式，对接线复杂的绕组最好先画出圆形接线简图，对照图形联接。

2）注意所留的引出线尽量靠近出线口，最好使引出线（三相绕组的三个首端和三个尾端）整齐地分别排列在出线口两侧。这些在接线前应该考虑好。

3）对生疏或复杂的接线，最好先预接，即预先将所连接点稍微“挂”在一起，经过检查是否有连接错误，若有错处容易纠正。

4）确信预接正确后，将待接部分的导线段漆膜刮净，用砂布磨光，去除氧化物及油污。并将剪好的绝缘套管穿入一端的导线内，然后进行连接。

5）绕组内导线的连接，若并绕根数少的采用绞接法，并联根数较多的采用对接法。如图 5-34 所示。

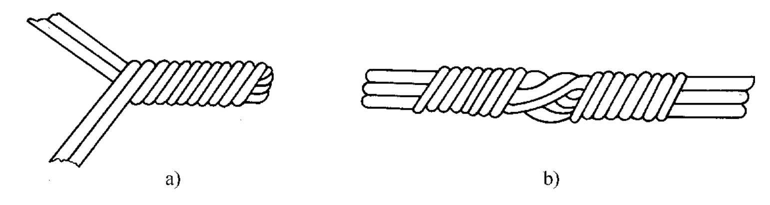


图 5-34　圆导线的连接

a）绞接法　b）对接法

6）引出线的选择和连接。电动机的三相引出线，采用的是专用引出线电缆，见表 5-23。其截面积大小根据电动机的额定电流按表 5-24 确定。

引出线和绕组接头的连接用绞接法或扎线法，如图 5-35 所示。

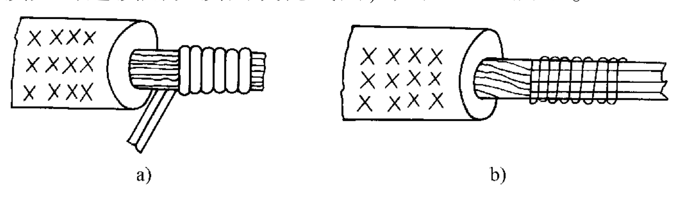


图 5-35　引出电缆的连接

a）绞接法　b）扎线法

7）接头的焊接。连接头的焊接常用锡焊、气焊和碳阻焊。对小型电动机绕组接头常用 150 瓦电烙铁熔焊锡焊接，或将接头放入已熔化的焊锡中粘焊；对较大容量的电动机绕组接头可用气焊（乙炔气焊）或碳阻焊。以上无论哪种焊接一定要注意焊牢，且焊接部分要平滑，不能留下过大的焊瘤。

接头焊接后，将套在导线上的绝缘套管移过来，套住焊接接头部分，防止金属导电部分裸露在外。

8）绕组的整形包扎。绕组接线焊接完毕后，再对接线情况和各部分绝缘作一次检查，最好测量各相的直流电阻是否平衡。对位移的绝缘要整理到位。然后对绕组两端部线圈高出的部位垫上竹板敲打，整理或用橡胶锤直接敲打，使绕组端部整理成喇叭口状，以利绕组散热通风，并避免转子装配时擦伤。喇叭口的张度要求浑圆、美观，但端部外沿不得碰到机壳，距机座内圆应在 3mm 以上。然后再次检查端部绝缘铺垫的情况，将过高的端部绝缘剪平。最后用尼龙扎线对线圈端部与连接线及引出线连接头一起捆绑牢固。

绕组嵌放完毕后，要做必要的测量检查，检查主要包括：各相直流电阻是否平衡；对地和相间绝缘电阻的测量；对地和相间的耐压实验要符合一定的要求（见表 5-25），否则要进

行修整。这时的修整比绕组浸漆处理后要容易。

综上所述，电动机绕组的嵌绕是一项技术性较强的工序。稍有疏漏，就会使电动机造成事故隐患，比如，绕组的短路、接地或断路等隐患。所以，操作人员，既要认真，又要细心，不怕费力，更要讲求技巧才行。

表 5-23　中小型交流电动机常用引出线

型　　号	名　　称	用　　途
JACL—2 JACL—4 JACL—6 JACL—8	多层漆绸、纤维编织克线	适用于额定电压 380V 及以下电动机 E 级以下绝缘引出线
JHX JHXG—500	硅橡胶绝缘电动机绕组引出线	适用于额定电压 380V 及以下交流电动机 F 级以下绝缘引出线
JBV	耐热聚氯乙烯绝缘多股软铜线	适用于 380V 及以下交流电动机 A 级绝缘引出线
JBX	丁基橡胶绝缘多股软铜线	适用于 500V 及以下电动机 A 级绝缘引出线
JBXHF	丁基橡胶绝缘耐燃护套电动机引出线	适用于 500V 及以下耐燃电动机 A 级绝缘引出线
JBQ—500	橡胶绝缘丁腈护套引出线	适用于 500V 及以下电动机 E、B 级绝缘引出线
JBF—500	丁腈聚氯乙烯复合绝缘引接线	适用于 500V 及以下电动机 B 级绝缘引出线
JBYH—500	氯磺化乙烯橡皮绝缘引接线	适用于 500V 及以下交流电动机 B 级绝缘引出线
JFEH—500	乙丙橡胶绝缘引接线	适用于 500V 及以下交流电动机 F 级绝缘引出线

表 5-24　引出线截面积选择

电动机额定电流/A	引出线截面积/mm^2	电动机额定电流/A	引出线截面积/mm^2
6 以下	1.0	61 ~ 90	16
6 ~ 10	1.5	91 ~ 120	25
11 ~ 20	2.5	121 ~ 150	35
21 ~ 30	4.0	151 ~ 190	50
31 ~ 45	6.0	191 ~ 240	70
46 ~ 60	10	241 ~ 300	95

第十五节　三相异步电动机修复后的检查试验

为了保证电动机的运行质量，对经过改造、重绕、浸漆后的绕组必须进行检查和试验。本节主要对需要检查和试验的每个项目的要求和方法介绍一下。

一、外观检查

1. 嵌放接线后的检查

当绕组嵌放和接线完后，从外观上应检查以下几个方面：绕组端部长度是否一致和整齐；整形后的喇叭口是否符合要求，其内圆是否比定子内圆大，绕组与机壳之间是否保持了

一定的绝缘距离；插入槽口的槽楔是否松动，有无高出槽口部分；槽绝缘应无破裂；端部相间绝缘位置是否正确，面积足够，且无松动、突出等现象；导线应无折痕，漆膜无刮伤脱落；接线处是否包扎好绝缘等。

2. 浸漆后检查

电动机绕组浸漆烘干处理后，主要检查浸漆是否饱满，有无遗漏之处；表面漆膜应均匀光亮不粘手；残留在铁心内表面上的余漆应铲除干净等。

二、绝缘电阻的测量

电动机的绝缘电阻主要包括每相绕组对铁心之间的电阻（对地绝缘电阻）和三相绕组之间的电阻（相间绝缘电阻）。对500V及以下的异步电动机，浸漆前，定子绕组的绝缘电阻不小于0.5MΩ；浸漆后的冷态情况绝缘电阻大于5MΩ。1000V以上的电动机，绕组绝缘电阻一般不低于1MΩ/kV。

检查绝缘电阻一般用绝缘电阻表测量。额定电压500V以下的电动机，用500V的绝缘电阻表；500～3000V电动机，用1000V绝缘电阻表；3000V以上的电动机，用2500V绝缘电阻表。

摇测时，绝缘电阻表摇动的转速要求120r/min，且均匀稳定待指针指示稳定后读取测量数值。

三、绕组直流电阻的测量

通过三相绕组的直流电阻测定值大小和平衡度，可以判断嵌放的绕组匝数、线径和接线及焊接情况是否正确与良好。

要求三相直流电阻的差异应满足下面的关系

$$\frac{R_{最大}-R_{最小}}{R_{平均值}}<5\% \tag{5-23}$$

式中　$R_{平均值}=\dfrac{R_U+R_V+R_W}{3}$

1. 直流电桥法

用直流电桥直接测量各相绕组的直流电阻，用单臂电桥（又叫惠斯顿电桥）测1～$10^6\Omega$的绕组电阻；用双臂电桥（又叫凯尔文电桥）测1Ω以下的低值电阻。

2. 用直流电压、电流法

实验接线图如图5-36所示。

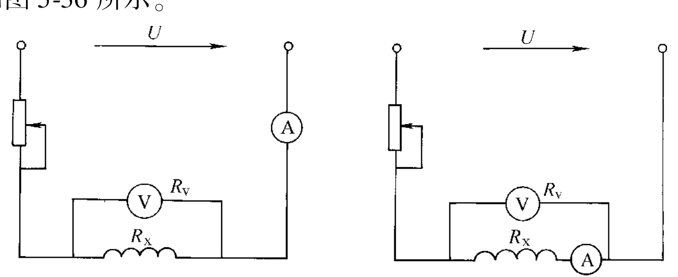


图5-36　直流电压、电流法测绕组电阻

用测得的直流电压和电流值（U和I）可计算出每相电阻，即

$$R_x = \frac{U}{I} \tag{5-24}$$

式中　U——电压表的测量值（V）;

I——电流表的测量值（A）。

测量时，电流表的读数不应大于被测绕组额定电流的 20%。

四、耐压实验

在绕组与铁心之间及每相绕组之间做交流耐压试验是保证绕组绝缘可靠性的重要措施。在线圈包扎、嵌放、接线、总装等过程中都有可能损伤绝缘。因此，在进行上述各工序后，均需进行耐压试验。如绝缘被高压击穿，可及时进行修补，避免更大的返工。

不同的耐压标准见表 5-25。表中所列的耐压值，除装配后的试验必须符合国家标准外，其余试验视具体情况而定。

表 5-25　电动机重换绕组时交流耐压标准

试验工序	电动机额定电压 U_N(V)			耐压时间
	<500	<3300	3300～6600	
嵌线前	—	$2.75U_N+4500$	$2.75U_N+4500$	1～2s
嵌线后	$2U_N+2500$	$2.5U_N+2500$	$2.5U_N+2500$	
嵌线后	$2U_N+2000$	$2.25U_N+2000$	$2.25U_N+2000$	
装配后	$2U_N+1000(>1500)$	U_N+1000	$2.5U_N$	1min

对 380V 的电动机中间也可不做耐压试验。装配后的耐压试验也可用 2500V 的绝缘电阻表摇测 1min 代替。

做实验的调压变压器和高压试验变压器应有足够的容量，对于低压电动机绕组而言，每 1kV 试验电压，变压器的容量不宜小于 1kVA。

在耐压实验中一定要注意安全，高压变压器及调压变压器的外壳一定可靠接地。

五、匝间绝缘试验

匝间绝缘试验的目的是检查绕组间的绝缘，可以考察出在嵌线浸漆、装配及搬运时绕组绝缘是否受到损伤。

试验要在电动机空载时进行。试验时外加电压为额定电压的 130%，试验时间为 3min。若在 130% 额定电压下，电动机的空载电流超过额定电流，则试验时间可缩短至 1min。

试验时，先施加额定电压，如果电动机情况正常，则继续提高电压到 130% 额定电压。若试验时发生异常现象，要立即断开电源。损坏处将会过热、变色、流胶、焦味、冒烟。根据这些现象判断查找故障部位。

试验需要一个电压可调节的交流电源，如可调变压器。对于多绕组的多速电动机，对每一额定转速的绕组都要进行试验。若是单一绕组的多速电动机，可仅对其最大转速接线方式进行试验。对绕线转子三相异步电动机（大型 2/4 极电动机除外），试验应在转子开路及静止时进行。其他电动机试验可在空载运转状态下进行。

六、空载试验

见第三章第二节的空载运转检查部分。

第六章　单相交流电动机

单相交流电动机是指用单相交流电源供电的一类电动机。最常见的有单相交流异步电动机，单相交流串激电动机，以及单相同步电动机等。本章重点介绍前两种单相交流电动机的特点、使用以及维护修理方法。

第一节　单相交流异步电动机概述

单相交流异步电动机的主要优点是结构简单，成本低廉，且特别适用于民用电源。它的容量比较小，从几瓦到几百瓦，它不仅在工、农业生产及各行业上作微型机械的动力，而且更多地应用于民用家庭电器，商业服务及办公用具等设备中。本节先介绍一下它的工作原理、结构特点以及分类和工作场合等。

一、单相交流异步电动机的工作原理

我们已经知道，三相异步电动机的三相对称定子绕组通入三相正弦交流电后，在电动机内便产生一个一定磁极数的旋转磁场。使其转子产生感应电流及转矩，驱动转子沿固定的方向起动并旋转起来。如果单相电动机的定子只嵌放一相绕组，并通入单相交流电流后，理论和实践证明，电动机内只会产生一定磁极数的脉振磁场。虽然也可对转子导体产生感应电流，可是分析得知，若转子静止（即 $n=0$），转子上就不产生电磁转矩。换句话说，电动机在静止状态时不能自行起动。但是，若当转子无论向哪个方向转动，只要转速不为零（比如在外力下，转子开始转起来），那么转子便产生电磁转矩，并和转动方向相同。这时，转子在这个电磁转矩作用下，即可自行旋转起来。

以上分析可知：单相异步电动机定子上只有一相绕组，即使通入交流电流，电动机也不能自行起动，而且转向不定。这在实际中是不适用的。

根据交流电动机旋转磁场产生的条件，实际的单相电动机，定子上除了嵌放一个单相主绕组外，还要放置一个副绕组。副绕组在铁心圆周上的位置与主绕组互差一个空间电角度（最好是 90°），主、副绕组并联后再接到单相交流电源上。并且使两相绕组电流有一定的相位差，最好互差 90°时间电角度。在这种情况下，电动机就会产生一个旋转磁场。于是，它就和三相异步电动机一样，既能自行起动，又能沿某一固定方向稳定运行。

单相异步电动机的原理结构图如图 6-1 所示。它的定子铁心及笼型转子和三相异步电动机相似，与三相异步电动机最主要的区别是定子嵌放的是两相绕组，且并联后再接到单相交流电源上。

二、单相异步电动机的分类

根据定子两相绕组产生旋转磁场的方法不同，以及两相绕组在电动机工作时所起的作用不同，单相电动机有两大类：一类是分相（裂相）电动机，一类是罩极电动机。

1. 分相电动机

又称裂相电动机。根据异步电动机产生旋转磁场的原理，定子上要有两相在空间互差

90°电角度的绕组，两相绕组中分别通入两相（有一定的相位差）交流电流后，才能产生旋转磁场。第一个条件在绕组嵌放时可保证，第二个条件的实现是靠两相绕组的阻抗性质和大小不同而获得。这就是“分相”的含义。常见的分相方法有两种：一种是电阻分相，绕制的主绕组线径粗，匝数多，而副绕组导线细，匝数少，或者在副绕组外串一个电阻，这样，两相绕组并联后接在单相交流电源上，两绕组上的电流就有相位差。这种分相的两相电流相位差小于90°。另一种是电容分相，即在副绕组上外串一个适当的电容器，这样两绕组并联后，两相电流也有相位差，且相位差可达到90°。电容分相比电阻分相产生的旋转磁场要好。

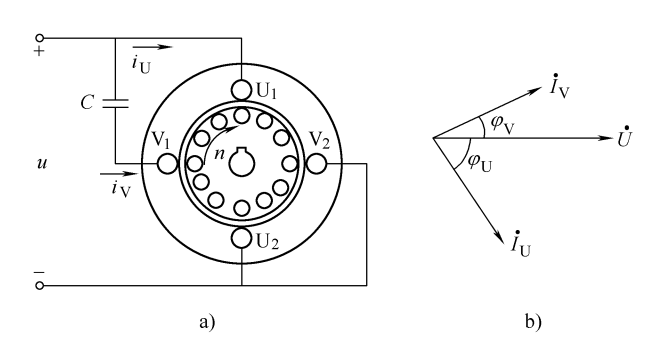


图 6-1 单相异步电动机原理图

分相电动机根据起动和运行方式的特点不同又分为四种：

（1）电阻分相起动电动机（国产代号为 BO、BO2）

属电阻分相。但副绕组还串联一个开关（离心开关或电磁开关），起动时开关闭合，主、副绕组共同作用，使电动机起动。当电动机的转速达到同步转速的 75% ~80% 时，开关断开，副绕组切离电源，运行时只靠工作绕组。这种电动机的功率一般在 40 ~370W。

（2）电容分相起动电动机（国产代号为 CO、CO_2）

副绕组与外接电容串联并串接开关，再与主绕组并联后接入交流电源。同样当转速达到同步转速的 75% ~80% 时，开关打开，副绕组被切除，只靠主绕组工作。这种电动机的功率在 120 ~750W。

（3）电容分相运转电动机（国产代号为 DO、DO_2）

副绕组只外串电容器再和主绕组并联接入交流电源，电动机起动和运转时，主、副绕组共同工作。这种电动机较之其他形式的电动机结构简单，运转性能好，但起动转矩小，功率在小于 180W。

（4）电容分相起动运转电动机（国产代号为 YL 或 E）

副绕组和两个相互并联的电容器串联，其中一个电容器上串接开关。只在起动时工作，称起动电容器。起动完毕，开关将其断开。另一个电容器始终参与副绕组工作，称运转电容器，且起动电容器容量大，运转电容器的容量小。这种电动机综合了电容起动电动机和电容运转电动机的优点，有比较好的起动性能和运转性能。容量可达到 1. 5 ~2. 2kW。

2. 单相罩极式电动机（国产代号为 F）

单相罩极式电动机分凸极式和隐极式两种。

表 6-1　几种常用单相异步电动机比较表

比较项目 \ 电动机		电阻分相起动电动机	电容分相起动电动机	电容分相运转电动机	电容分相起动运转电动机	单相罩极电动机
电动机的结构	定子绕组组成	运转绕组、起动绕组	运转绕组、起动绕组	主绕组、副绕组	主绕组、副绕组	主绕组、罩极线圈
	转子	笼型	笼型	笼型	笼型	笼型
	起动装置	起动继电器或离心开关	起动继电器或离心开关	—	起动继电器或离心开关	—
	辅助装置	—	起动用电容器	运转用电容器	起动和运转用电容器	—
	等效电路					
电动机的特性	起动电流 I_{st}/I_e	6－7	4－5	3－5	4－5	2－4
	转矩特性曲线					
	起动转矩 T_{st}/T_e	1.2～2	2.5～3.5	0.3～1	2.5～3.5	0.3～0.8
	功率因数	0.4～0.75	0.4～0.75	0.7～1	0.8～1	0.4～0.75
主要优缺点		1）价格低，应用广泛 2）起动电流大，起动转矩较小	1）造价稍高 2）起动电流较大，起动转矩较大	1）无起动装置，结构较简单，工作可靠 2）功率因数较高 3）起动转矩较小	1）附件多，结构复杂，价格较高 2）起动电流大 3）起动转矩较大 4）功率因数高	1）结构简单、价格低，工作可靠 2）起动转矩最小 3）效率低
应用范围		1）单相鼓风机 2）起动转矩小的一般动力，如钻床，研磨机，搅拌机等	1）起动转矩要求大的场合 2）用于压缩机、冷冻机、井泵等	1）起动转矩小的场合，如电风扇 2）用于起动与停止频繁的场合 3）需要正反转的场合	1）用于起动转矩大的机械 2）要求功率因数高的场合	1）功率小，用于要求起动转矩小的场合 2）多用于风扇，电唱机、仪器仪表等

凸极式罩极电动机采用凸极定子，主绕组是集中绕组，而副绕组是一个单匝短路铜环，嵌放在磁极的极面一侧，罩住部分极面，故称罩极电动机。结构简单，但性能较差。电动机功率在 20 ~ 90W。

隐极式罩极电动机的定子绕组采用分布绕组，主绕组分布于定子槽中，副绕组是较粗绝缘电磁线（一般用 ϕ0.8 ~ 1.5mm）绕制成几匝（一般为 2 ~ 8 匝）线圈自行短接。分布的槽数占总槽数的 1/3。且和主绕组在空间互差 30° ~ 60°电角度。这类电动机的功率在 0.5 ~ 120W。

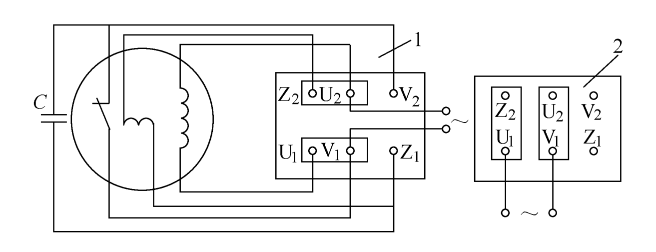


图 6-2 电容起动单相电动机的接线板上的位置

1—正转 2—反转

几种单相异步电动机列表 6-1 中，请读者自行比较。

三、单相异步电动机的接线端标志

单相异步电动机的主绕组首、末端用 U_1、U_2 表示，副绕组（或起动绕组首、末端用 Z_1、Z_2 表示，有抽头时用 U_3、U_4 表示或 Z_3、Z_4 表示。电动机接线原理图如表 6-1 所示。接线板标志典型例证如图 6-2 所示。

第二节 单相异步电动机的定子绕组

本节主要介绍单相异步电动机定子绕组的嵌放原则、特点以及举出目前常见定子绕组的嵌放布置方法和类型，供读者使用和修理时参考。

一、单相异步电动机定子绕组的嵌绕原则

1）对分相式单相电动机定子的主副绕组在空间要互差 90°电角度。对罩极单相电动机，凸极式罩极线圈要罩住极面的 1/3 ~ 1/2。且根据电动机的转向，每个罩极线圈均放在每极的相同侧面。对隐极式电机，罩极线圈与主绕组空间互差 30° ~ 60°，常取 45°电角度。

2）由于单相电动机的功率不大，且大多为 2 极或 4 极，所以定子绕组的嵌放选择力求工艺简单，操作方便。

3）分相式电动机主副绕组的线径、匝数、节距等不一定完全相同，因功率不同，起动和运行方式不同而异。

二、单相异步电动机定子上的正弦绕组

为了改善单相异步电动机的电气性能，节省材料，且嵌放方便，它的定子绕组大多采用了正弦绕组。所谓正弦绕组，其布线形式亦为同心式，但各线圈安排的匝数不同，是按正弦规律布线的。这样，能有效的抑制了单相电动机内 3、5、7 次谐波磁场。

1. 正弦绕组的安排类型

正弦绕组每极线圈的安排类型有 A 类和 B 类两种。

（1） A 类安排

如图 6-3a 所示，同心线圈组中最大线圈的节距等于极距，因此相邻两组的大线圈将重迭于一个槽，该槽为双层线圈，线圈匝数等于该槽分配匝数的一半。在每极线圈相等的条件

下，A 类安排的绕组系数稍高，且电气性能稍优，但工艺性略差。

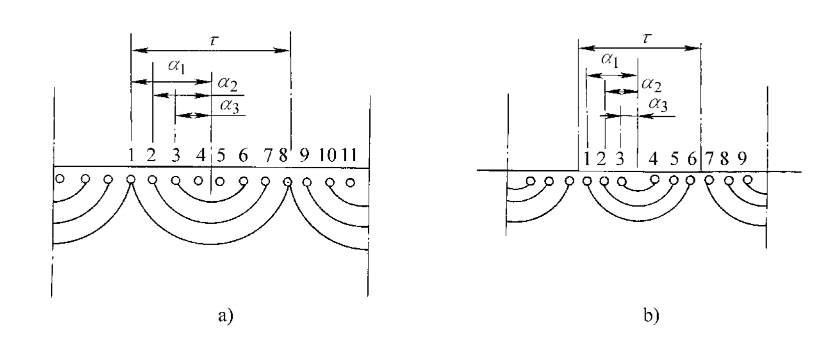


图 6-3　单相正弦绕组的安排类型

a）A 类安排　b）B 类安排

（2）B 类安排

如图 6-3b 所示，最大线圈的节距小于极距 1 槽，同相相邻两组没有重叠线圈，故工艺性好。但绕组系数和电气性能稍差。

2. 正弦绕组的布线

正弦绕组的主副绕组占槽没有普通单层绕组的固定比例，而是根据设计需要而选择不同的布线方案。

（1）满圈布线

满圈是一相绕组每极线圈数等于每极槽数$\left(\text{即 } S_{\mathrm{p}}=\dfrac{Q}{2\times 2P}\right)$，满圈布线使正弦绕组成双层形式。如图 6-4 所示。满圈正弦绕组能使电动机的磁场在气隙中获得较完整的正弦布线，从而改善电动机的电气性能，但绕组系数较低，电动机的用铜量增加。

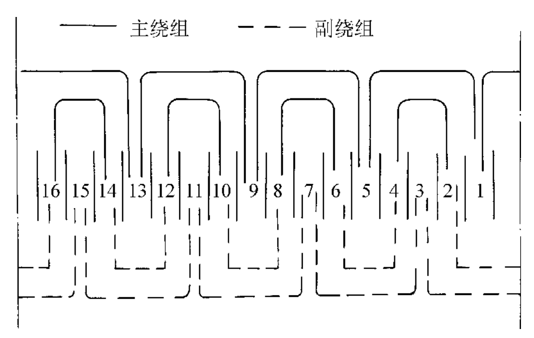


图 6-4　正弦绕组的满圈布线

（2）缺圈布线

当一相绕组每极线圈小于每极槽数时称为缺圈布线。缺圈数无规定，但缺圈增多则绕组系数也提高，而电气性能随之下降。通常，为使线圈更有效地发挥电磁效能，所缺线圈应从小线圈减除。这时，缺圈正弦绕组则成为线圈不等匝的单双层混合结构，而缺圈越多，则绕组中的单层线圈越多。图 6-5 所示为缺圈布线的一例。

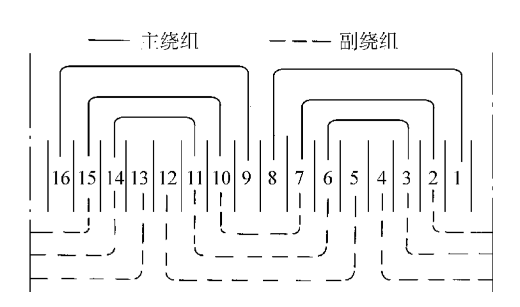


图 6-5　正弦绕组的缺圈布线

（3）主、副绕组的布线

正弦绕组的主、副绕组可根据设计而选用 A 类或 B 类安排，也可根据电动机性能而选用满圈或缺圈。但将电动机修理重绕时，要按原来的布线

形式，不宜改动。主副绕组在空间的安排也必须满足互差 90°电角度的要求，见图 6-4 和图 6-5。至于每相的进线从每极同心线圈组的大圈或小圈引出，则遵从各人的操作习惯。本书采用的大众习惯是由大线圈进线。

3. 正弦绕组的线圈匝数分配

正弦绕组每极（主或副绕组）匝数是根据定子电磁参数确定的，与一般单相电动机的算法基本相同。

若电动机的主绕组每极总匝数为 W_{mp}，导线截面积为 S_m

则电动机的副绕组每极总匝数 W_{np}和导线截面积 S_n 为

电阻分相起动和电容分相起动式：$W_{np}=(0.5\sim0.7)W_{mp}$

$$S_n=(0.5\sim0.25)S_m$$

电容运转式：

$$W_{np}=(1\sim1.3)W_{mp}$$

$$S_n=\frac{S_m}{1\sim1.3}$$

当每极总匝数 W_{mp}和 W_{np}确定后，通常采用下列方法来确定各线圈的匝数分配。

查阅布线方案表，各线圈所分配的匝数可由下式算出

$$W_y=K_y\cdot W_p$$

式中 W_y——节距为 y 的线圈匝数；

W_p——正弦绕组的每极匝数；

K_y——每极线圈分布匝比。

选择布线方案见表 6-2。

【例 6-1】 某电容运转电动机 $Q=24$ 槽，$2p=4$，主绕组每极匝数 $W_{mp}=209$ 匝，试算出主绕组每极线圈的匝数分配。

解：计算每极槽数，每极所占槽数实质为极距，故：

$$\tau=\frac{Q}{2p}=\frac{24}{4}=6\text{ 槽}$$

查表 6-2，选用方案 4，布线类型为 3A，绕组系数 $K_W=0.804$，各线圈匝数比 $K_1=26.8\%$，$K_2=46.4\%$，$K_3=26.8\%$。

这样，线圈 $y=1-7$ 的匝数 $W_{1-7}=K_1W_{mp}=0.268\times209=56$ 匝

线圈 $y=2-6$ 的匝数 $W_{2-6}=K_2W_{mp}=0.464\times209=97$ 匝

线圈 $y=3-5$ 的匝数 $W_{3-5}=K_3W_{mp}=0.268\times209=56$ 匝

三、单相异步电动机定子绕组布线形式典型举例

实际常见的单相异步电动机有 2 极、4 极，还有特别使用的 6 极电动机。其定子槽数有 8、12、16、18、20、24、32、36 等。现举几个典型例证说明它们的布线形式以及嵌放要点。

1. 12 槽 2 极定子绕组

12 槽 2 极定子绕组主要在电容运转电动机中应用，为改善电动机性能，绕组常采用正弦同心绕组。下面介绍两种正弦绕组的嵌放。

表 6-2 单相正弦绕组方案及匝数分布表

方案序号	每极槽数	布线类型	每极各槽线圈匝数比 K_y(%)																			绕组系数 K_W
			每极槽号																			
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	3	2A	50	50	50	50																0.750
2	4	2A	41.4	58.6		58.6	41.4															0.828
3	6	2A	36.6	63.4				63.4	36.6													0.915
4		3A	26.8	46.4	26.8		26.8	46.4	26.8													0.804
5	8	2A	35.2	64.8						64.8	35.2											0.905
6		3A	23.5	43.4	33.1				33.1	43.4	23.5											0.87
7		4A	19.9	36.8	28.0	15.3		15.3	28.0	36.8	19.9											0.796
8	9	2A	34.7	65.3							65.3	34.7										0.960
9		3A	22.7	42.6	34.7					34.7	42.6	22.7										0.893
10		4A	18.5	34.7	28.3	18.5			18.5	28.3	34.7	18.5										0.820
11	12	2A	34.1	65.9										65.9	34.1							0.978
12		3A	21.4	41.4	37.2								37.2	41.4	21.4							0.936
13		4A	16.4	31.8	28.5	23.3						23.3	28.5	31.8	16.4							0.833
14		5A	14.1	27.3	24.5	20.0	14.1				14.1	20.0	24.5	27.3	14.1							0.829
15		6A	13.2	25.4	22.8	18.6	13.2	6.8		6.8	13.2	18.6	22.8	25.4	13.2							0.790
16	16	3A	20.8	40.8	38.4												38.4	40.8	20.8			0.963
17		4A	15.5	30.3	28.5	25.7										25.7	28.5	30.3	15.5			0.929
18		5A	12.7	24.9	23.4	21.1	17.9								17.9	21.1	23.4	24.9	12.7			0.889
19		6A	11.1	21.8	20.5	18.5	15.7	12.4						12.4	15.7	18.5	20.5	21.8	11.1			0.848
20		7A	10.3	20.0	18.9	17.2	14.4	11.3	7.9				7.9	11.3	14.4	17.2	18.9	20.0	10.3			0.812
21	18	4A	15.2	29.9	28.6	26.3												26.3	28.6	29.9	15.2	0.943
22		5A	12.3	24.3	23.2	21.3	18.9										18.9	21.3	23.2	24.3	12.3	0.910
23		6A	10.6	20.9	20.0	18.4	16.4	13.7								13.7	16.4	18.4	20.0	20.9	10.6	0.873
24		7A	9.6	18.9	18.1	16.7	14.7	12.4	9.6						9.6	12.4	14.7	16.7	18.1	18.9	9.6	0.837
25		8A	9.0	17.8	17.0	15.7	13.8	11.6	9.0	6.1				6.1	9.0	11.6	13.8	15.7	17.0	17.8	9.0	0.806

（续）

方案序号	每极槽数	布线类型	每极各槽线圈匝数比 K_y(%) 每极槽号																			绕组系数 K_W
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
26	6	2B	57.7	42.3			42.3	57.7														0.856
27		3B	50.0	36.6	13.4	13.4	36.6	50.0														0.776
28	8	2B	54.2	45.8					45.8	54.2												0.912
29		3B	41.1	35.1	23.8			23.8	35.1	41.1												0.827
30	9	2B	52.2	47.8						47.8	52.2											0.928
31		3B	39.5	34.8	25.7				25.7	34.8	39.5											0.856
32		4B	34.6	30.6	22.7	12.1		12.1	22.7	30.6	34.6											0.793
33	12	2B	51.8	48.2									48.2	51.8								0.939
34		3B	36.6	34.1	29.3							29.3	34.1	36.6								0.910
35		4B	29.9	27.8	24.0	18.3					18.3	24.0	27.8	29.9								0.855
36		5B	26.8	25.0	21.4	16.5	10.3			10.3	16.5	21.4	25.0	26.8								0.806
37		6B	25.9	24.1	20.7	15.9	10.0	3.4	3.4	10.0	15.9	20.7	24.1	25.9								0.783
38	16	3B	35.1	33.8	31.1											31.1	33.8	35.1				0.947
39		4B	27.6	26.5	24.5	21.4									21.4	24.5	26.5	27.6				0.910
40		5B	23.5	22.6	20.8	18.2	14.9							14.9	18.2	20.8	22.6	23.5				0.869
41		6B	21.1	20.4	18.7	16.4	13.4	10.0					10.0	13.4	16.4	18.7	20.4	21.1				0.829
42		7B	19.9	19.2	17.6	15.4	12.7	9.4	5.8			5.8	9.4	12.7	15.4	17.6	19.2	19.9				0.798
43	18	3B	34.7	33.7	31.6													31.6	33.7	34.7		0.958
44		4B	27.0	26.2	24.6	22.2											22.2	24.6	26.2	27.0		0.927
45		5B	22.7	22.0	20.6	18.6	16.1									16.1	18.6	20.6	22.0	22.7		0.892
46		6B	20.1	19.5	18.2	16.5	14.2	11.5							11.5	14.2	16.5	18.2	19.5	20.1		0.855
47		7B	18.5	17.9	16.8	15.2	13.2	10.6	7.8					7.8	10.6	13.2	15.2	16.8	17.9	18.5		0.821
48		8B	17.6	17.1	16.0	14.5	12.5	10.2	7.5	4.6			4.6	7.5	10.2	12.5	14.5	16.0	17.1	17.6		0.795

一种是 A 类正弦绕组，图 6-6 所示为其绕组展开图，图 6-7 所示为绕组端视图。

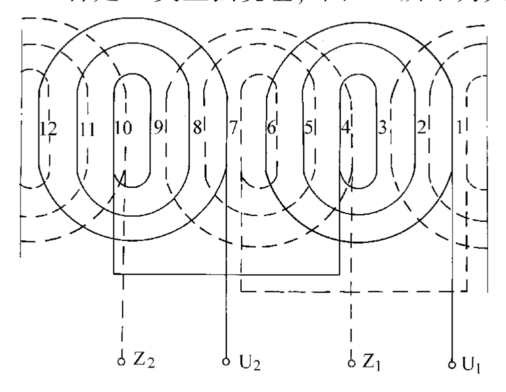


图 6-6　12 槽 2 极单相电动机
定子绕组（A 类）展开图

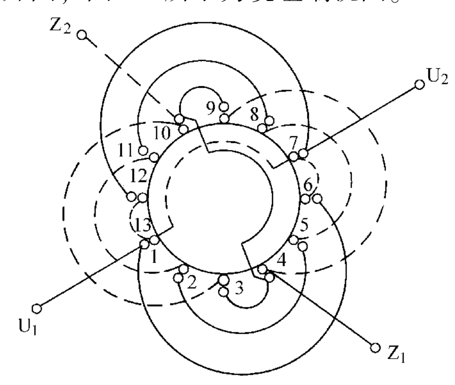


图 6-7　12 槽 2 极单相电动机
定子绕组（A 类）端视图

这种绕组的主、副绕组均采用 A 类满圈安排成双层布线。每极有 3 只线圈。每相两组线圈是反向串联，即“尾—尾”相联。主要用在单相电容运转电动机中。此绕组的电气性能好，但绕组系数低，且槽内又要层间绝缘，耗工时多。嵌放时采用分层整嵌法，其嵌放顺序见表 6-3。

表 6-3　分层整嵌法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	下层	3	5	2	6	1	7	9	11	8	12		
	上层											7	1
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	下层					4	10						
	上层	6	8	5	9			12	2	11	3	4	10

另一种是 B 类正弦绕组，图 6-8 所示为其绕组展开图。图 6-9 所示为绕组端视图。

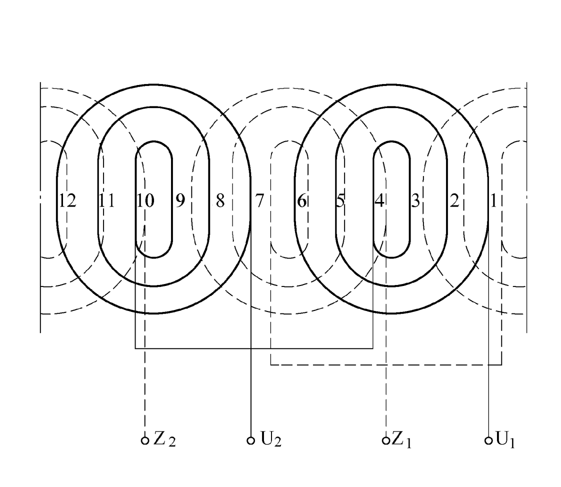


图 6-8　12 槽 2 极单相电动机
正弦绕组（B 类）展开图

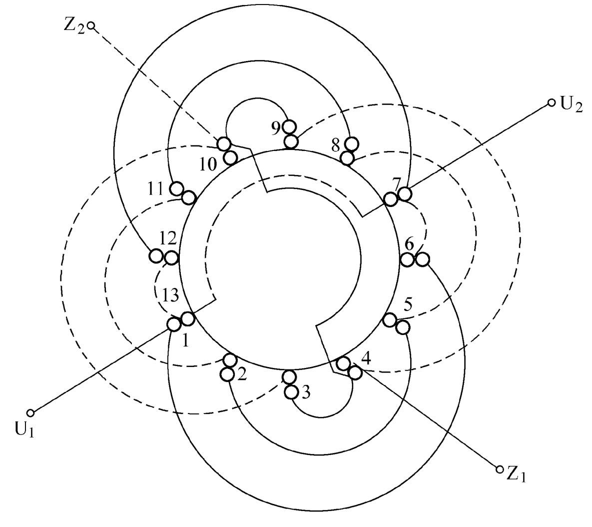


图 6-9　12 槽 2 极单相电动机
正弦绕组（B 类）端视图

这种绕组的主、副绕组采用相同的布线方案，每相分两组由 3 个同心线圈组成，最大线圈的节距小于极距，故属 B 类正弦绕组。也是双层绕组，因最大节距线圈无需同槽嵌放，嵌线不用吊边，且构成完全的两个平面，工艺简单，也主要用于电容运转电机中。

嵌放采用分层整嵌法，嵌放顺序见表 6-4。接线是反向串联，即“尾—尾”联接。

表 6-4　分层整嵌法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	下平面	3	4	2	5	1	6	9	10	8	11	7	12
	上平面												
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	下平面												
	上平面	6	7	5	8	4	9	12	1	11	2	10	3

2. 36 槽 4 极定子绕组

在单相分相电动机中，定子为 36 槽的只见于较大功率的电容起动电动机，且一般为 4 极。4 极 36 槽定子绕组多嵌放正弦绕组，比如 4/2-A/B 型、4/3-A/B 型、4/3-B/A 型等。这里仅以 4/2-A/B 型为例来说明该绕组的嵌放特点。

对 4/2-A/B 型定子绕组，主绕组的每极相组含 4 个同心线圈，接 A 类布线；副绕组每极相组含 2 个同心线圈，按 B 类布线。主、副绕组均按正弦绕组分配线圈匝数，且同相相邻极相组之间为反向串联连接。主绕组占槽较多，布线合理，对高次谐波可基本削弱掉，所以该绕组是一种比较典型的起动型绕组。故它多用在电容起动型单相电动机中。该绕组的展开图如图 6-10 所示，绕组端视图如图 6-11 所示。

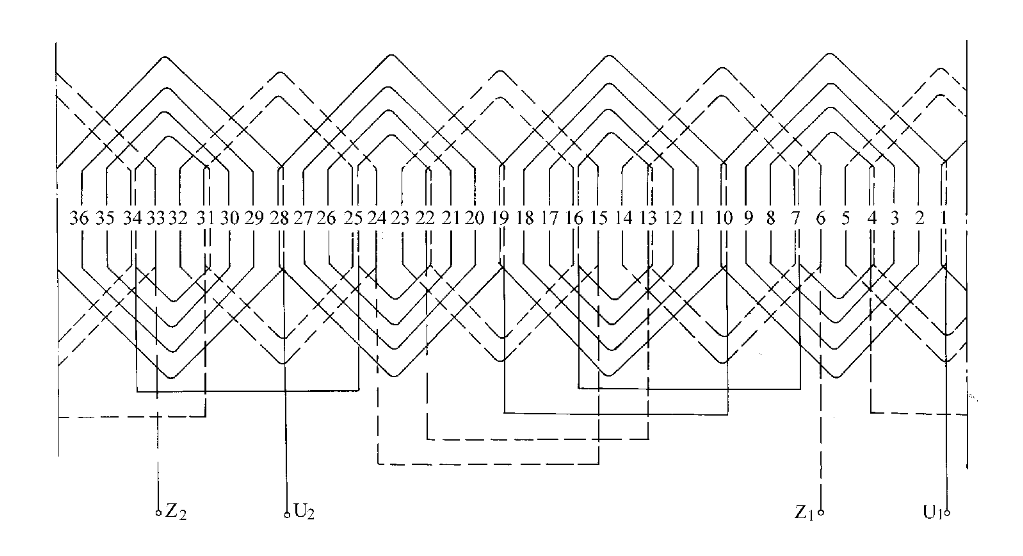


图 6-10　4 极 36 槽 4/2-A/B 型正弦绕组展开图

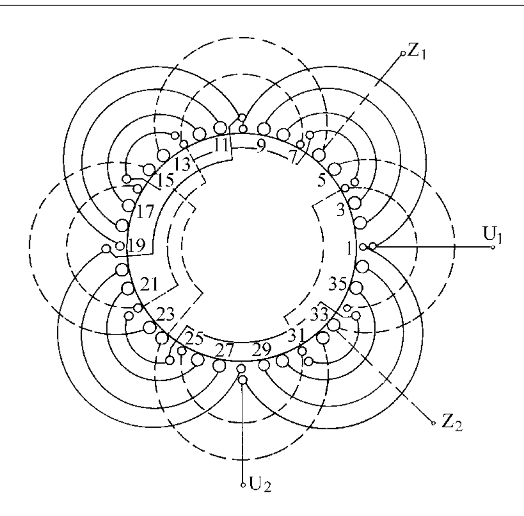


图 6-11　4 极 36 槽 4/2-A/B 型正弦绕组端视图

该绕组采用分层法嵌放，先嵌放主绕组，后嵌放副绕组。但对主绕组有两种嵌放法。

（1）分层交迭法

主绕组的大线圈交迭嵌放，需吊起一个边嵌放，嵌线顺序见表 6-5。

（2）分层整嵌法

主绕组对面嵌放，嵌线顺序见表 6-6。

表 6-5　分层交迭法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
槽号	下层	4	7	3	8	2	9	1	31	34	30	35	29	36	28	1	22
	上层																
嵌放顺序		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
槽号	下层	25	21	26	20	27	19	28	13	16	12	17	11	18	10	19	10
	上层																
嵌放顺序		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
槽号	下层																
	上层	7	13	6	14	34	4	33	5	25	31	24	32	16	22	15	23

表 6-6　分层整嵌法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
槽号	下平面	4	7	3	8	2	9	1	10	22	25	21	26	20	27	19	28
	上平面																
嵌放顺序		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
槽号	下平面	13	16	12	17	11	18	10	19	31	34	30	35	29	36	28	1
	上平面																
嵌放顺序		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
槽号	下平面																
	上平面	7	13	6	14	34	4	33	5	25	31	24	32	16	22	15	23

3. 凸极式罩极电动机定子绕组

凸极式定子由于结构特殊，故其主绕组和罩极绕组都简单。图 6-12 所示为 4 极凸极式电动机的定子结构示意图。其主绕组是集中式绕组线圈缠绕在各磁极铁心上，将各线圈按相邻极性相反的原则依次串联起来。接于单相交流电源。

每极的极面同一侧开有槽，将自行短路的罩极绕组镶嵌在槽内罩住部分磁极。罩极绕组是一匝短路铜环，被罩的极面积约占整个极面的 1/3 ~ 1/2。

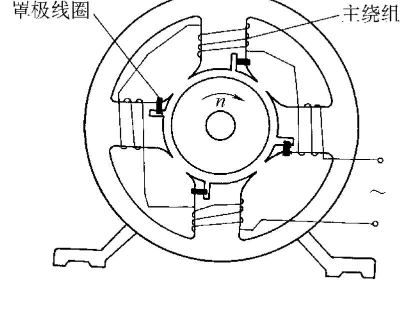


图 6-12　4 极凸极式罩极电机定子结构示意图

4. 24 槽 4 极隐极式罩极电动机定子绕组

该绕组的主绕组，每极相组由 3 个同心线圈组成，并为 A 类正弦绕组布线，绕组的占槽率较高，且基本上能削弱高次谐波而获得良好的电气性能。罩极绕组的每极下由 2 个同心线圈组成，且为长节距随主绕组采用反向串联，最后接为闭合回路。罩极绕组偏角 $\theta = 45°$，无论起动和运行性能都适中，是一种最常用的布线形式。图 6-13 所示为其展开图，图 6-14 所示为其端视图。

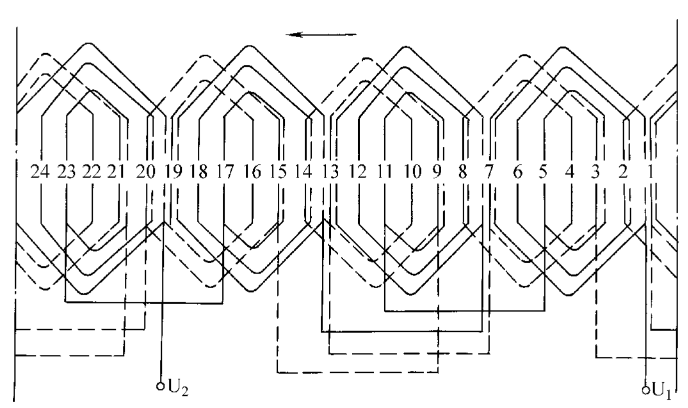


图 6-13　4 极 24 槽罩极电动机定子绕组展开图

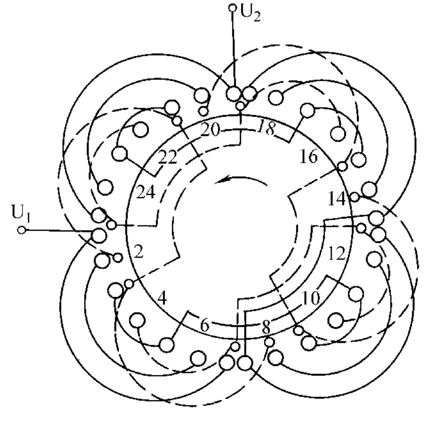


图 6-14　4 极 24 槽罩极电动机定子绕组端视图

该绕组仍采用分层整嵌法嵌放，嵌放顺序见表 6-7。

表 6-7　分层整嵌法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
槽号	下平面	3	5	2	6	1	7	9	11	8	12
	上平面										
嵌放顺序		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
槽号	下平面	7	13	15	17	14	18	13	19	21	23
	上平面										
嵌放顺序		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
槽号	下平面	20	24	19	1						
	上平面					4	7	3	8	10	13
嵌放顺序		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
槽号	下平面										
	上平面	9	14	16	19	15	20	22	1	21	2

5. 单相吊扇电动机定子绕组

单相吊扇是一种大扇叶、慢转速的风扇，常用的电动机采用 18、16、14 三种磁极数，个别的用 12 极，因为磁极数多，每极相组只有一个线圈，绕组形式为单层链式，且为庶极布线。电动机为电容运转型，其主、副绕组在空间仍互差 90°电角度。因为吊扇俯视时的旋转方向为顺时针方向，所以电动机绕组的接线均依此转向绘制。电动机引线为 3 根，主绕组首端为 U、副绕组首端为 V。两绕组尾端接在一起的公共端为 G。

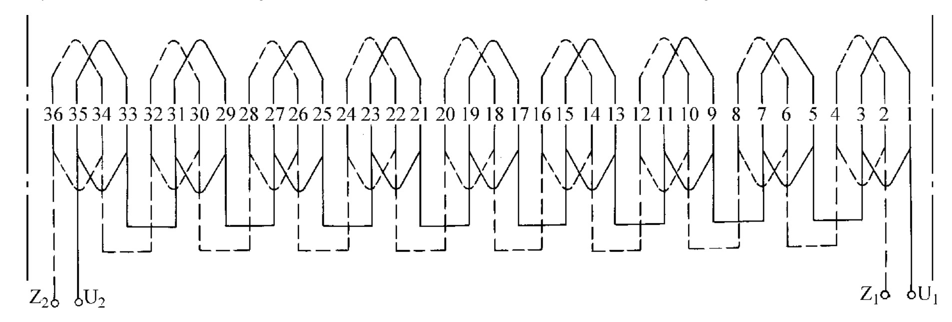


图 6-15　18 极 36 槽吊扇定子绕组展开图

现以 18 极 36 槽吊扇电动机定子绕组为例，它的主、副绕组各有 9 个线圈，且节距相同，节距 $y=2$。庶极接线即同相相邻线圈按“首—尾”顺向串联。因此绕组线圈少，嵌放方便，是目前常用的绕组形式。其绕组展开图如图 6-15 所示，绕组端视图如图 6-16 所示。

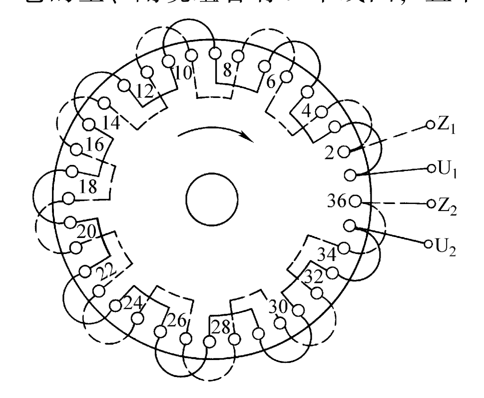


图 6-16　18 极 36 槽吊扇定子绕组端视图

对此类绕组为减少接线，可采用连绕工艺。但嵌放时要注意极性。嵌放方法有两种：

（1）分组嵌放

以主、副绕组各一个线圈为一组，先嵌主绕组线圈，后嵌放副绕组线圈，逐组嵌放，嵌线顺序见表 6-8。

表 6-8　分 组 嵌 放

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	下层	3	1			7	5			11	9			15	13			19	17
	上层			4	2			8	6			18	10			16	14		
嵌放顺序		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
槽号	下层			23	21			27	25			31	29			35	33		
	上层	20	18			24	22			28	26			32	30			36	34

（1）分层整嵌

先将主绕组线圈全部嵌入相应槽内，再嵌放副绕组线圈，使之形成不连续的双平面结构，嵌放顺序见表 6-9。

表 6-9　分 层 整 嵌

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
槽号	下平面	3	1	7	5	11	9	15	13	19	17	23	21	27	25	31	29	35	33
	上平面																		
嵌放顺序		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
槽号	下平面																		
	上平面	4	2	8	6	12	10	16	14	20	18	24	22	28	26	32	30	36	34

第三节　单相异步电动机的使用要点

随着单相异步电动机的广泛应用，虽然对它的使用和三相异步电动机有相似之处，但还是有其特点。本节重点介绍对它的使用要点。

一、查看额定值和接线

使用前，一定要先查看电动机铭牌上的额定条件，如电源的电压和频率是否和电动机额定值一致，特别是电压的大小。一般单相异步电动机的额定值有 220V、42V、36V、24V、12V，要求使用电源电压大小和电动机额定值不允许超过 ±5%。电源电压过高，电动机的电流会过大，会使温升偏高，电动机容易烧坏。电源电压过低，电动机的出力降低，带负载的能力下降，电动机也容易烧坏。

其次，电动机所带的机械负载功率要等于或接近（小于）电动机额定值，若过载使用，电动机会过热。单相异步电动机的功率额定值有：0.4W、0.6W、1.0W、2.5W、4W、6W、10W、16W、25W、40W、60W、90W、180W、250W、370W、550W 及 750W。

电动机定子绕组端部均按国家标准标注着符号（标志），有的电动机采用不同的颜色表示不同的出线端，使用者一定要正确区分主、副或调节绕组及它们的首末端，严格按要求来接线。例如电容分相运转电动机，它们的定子绕组首、末端分别标注 U_1、U_2，副绕组首、末端标注 Z_1、Z_2，接线时，U_1 和 Z_1 并接在一起，Z_2 串接电容 C 后再与 U_2 并接在一起，并接后的两端点再接单相交流电源。如图 6-17 所示。

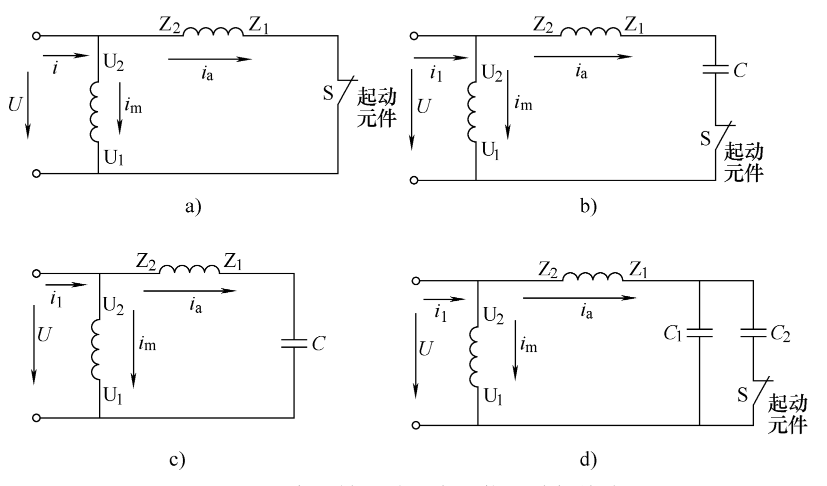


图 6-17　电容运转电动机定子绕组端部接线图

二、电容的更换

电容是电容电动机中起分相作用的重要部件，它的击穿短路或者断路均直接影响单相电动机的起动和运行。需要更换电容器时，特别要注意它的电容量和工作电压使之与原规格相符合。另外起动用的电容器及工作用电容器在种类选择上也不同，应该引起注意。表6-10是单相电动机的电容匹配表，供参考。

表6-10　单相电动机的电容匹配表

电动机容量/W	15	25	40	60	90	120	180	250	370	550	750
电动机的磁极数	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4
工作电容/μF（纸介）	1.2	1.2/2	2/2	2/4	4/4	4/4	4/6	6			
起动电容/μF（电解）						75	75	100	100	150	200

三、单相异步电动机的起动和反转

对于电容运转式和罩极式单相异步电动机，因为它们的起动转矩不为零，所以只要接通电源，即可直接起动。

对于有起动绕组的单相电动机，使用时必须采用一定的起动方法。常用的主要有两种方法：

1. 离心开关起动

离心开关装在电动机轴上，跟着转子一起旋转。开关串联在副绕组的线路中。电动机起动时，开关处于闭合状态，使副绕组及起动电容、电源接通。电动机起动后的转速达到同步转速的75%～80%时，离心开关依靠离心块的离心力克服弹簧的拉力（或压力），使开关的动触头与静触头脱离接触。从而切断绕组回路，使电动机仅在主绕组单独工作下正常运行。木工用电锯、小型机床等大多采用此种起动方法。

2. 电流继电器起动

电冰箱压缩机等用的电动机，起动频繁。为保证可靠性和使用寿命，目前采用电流继电器起动，图6-18所示为电冰箱压缩机用的电动机的控制原理图。KM1是电流型起动继电器，其吸引线圈和电动机主绕组串联，而它的常开触头和副绕组串联。

当电动机起动时，因为主绕组的起动电流较大，继电器动作，副绕组闭合于电源上。随着电动机起动后的转速升高，主绕组的电流减少。当电流减少到一定程度后，继电器复位，触点断开，切断副绕组回路，起动过程完成。图中，FR是过载保护用的热继电器。KM2是温度继电器，用以自动控制冰箱的温度。

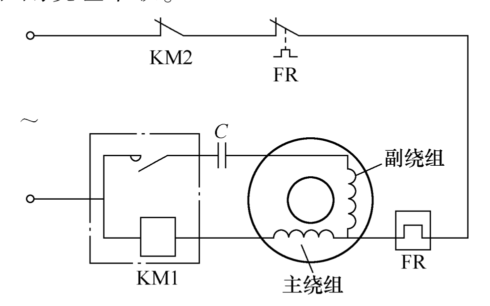


图6-18　电冰箱压缩机用的电动机的控制线路原理图

有的机械要求单相电动机经常正反转动。比如家用洗衣机中搅拌用的电动机，运行中一般在30s左右必须改变一次转向。单相分相异步电动机改变转向的方法是将主绕组或副绕组其中之一的两出线端对调一下，就会改变了旋转磁场的转向，从而电动机的转向得到改变。洗衣机使用的是电容运转式单相电动机，其主副绕组做得

完全一样，接线图如图 6-19 所示。通过转换开关 S，主副绕组不断变换，也可实现电动机转向的改变，很方便。

四、单相异步电动机的调速

单相异步电动机目前多采用减压的方法调节转速。现以与风扇配套用的电容运转式电动机为例，介绍几种减压调速方法。

1. 定子串电抗器调速

图 6-20 所示为这种调速方法的接线原理图。改接电抗器的插头，即可改变定子主、副绕组的端电压，实现电动机转速的调节。

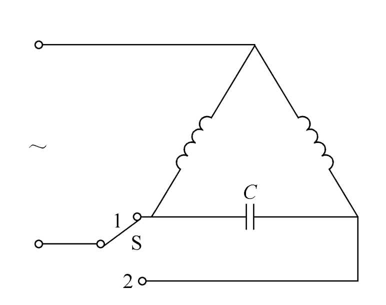


图 6-19　洗衣机中电动机的控制电路

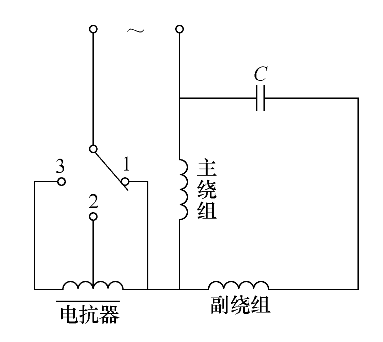


图 6-20　串电抗器调速的接线图

图中所示为三级变速。电源和触点 1 接通时电动机为最高速，与触点 2 接通时电动机为中速，与触点 3 接通时电动机则为最低速。

这种调速方法简单方便，但是无功耗电较多。

2. 定子串接调速绕组调速

单相异步电动机的定子内，除主、副绕组外，又嵌放一套调节绕组。将三套绕组采用不同的接法及换接调节绕组的抽头，即达到改变主绕组的端电压，实现电动机转速的调节。

介绍常用的三种接法：

（1）L 形接法

将调节绕组串接在主、副绕组之间，如图 6-21 所示。改变调节绕组的抽头位置，就改变了主、副绕组的电压比例，从而改变了电动机旋转磁场的强弱，达到调速的目的。

此接法中，电容器的耐压强度至少选为 400V 以上。否则，容易在调速时击穿。这种接法的缺点主要是电动机在低速时起动性能较差。

例如 L-2 型三速定子绕组，这类绕组的主、副绕组和调速绕组各有 4 个线圈，调速绕组和副绕组同槽上、下层嵌放。调速绕组的 4 个线圈分两组，且对称安排，两组中间有抽头，副、调绕组一致，为显极性，同极性串联。其展开图如图 6-22a 所示，接线原理图如图 6-22b 所示，其端视图如图 6-23 所示。该绕组嵌放工艺虽然较繁，但谐波影响较少，是三速电风扇常用的绕组形式。

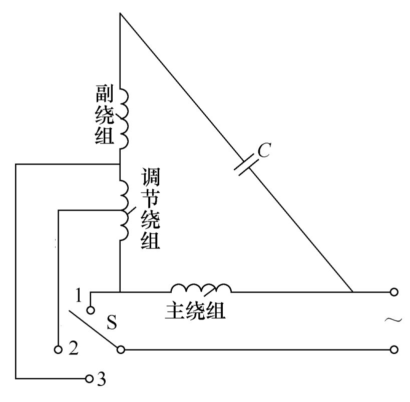


图 6-21　L 形接法调速线路图

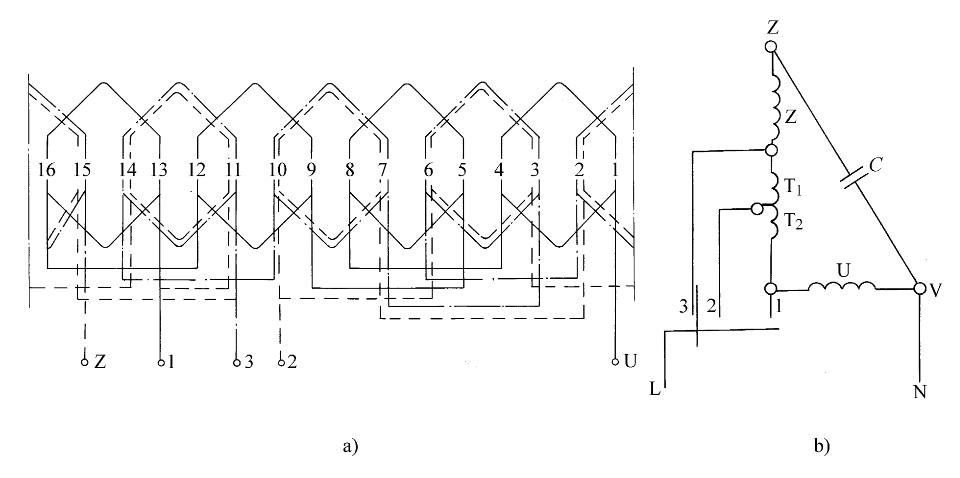


图 6-22　L-2 型 16 槽三速电机定子绕组展开图及接线原理图

a）绕组展开图　b）接线原理图

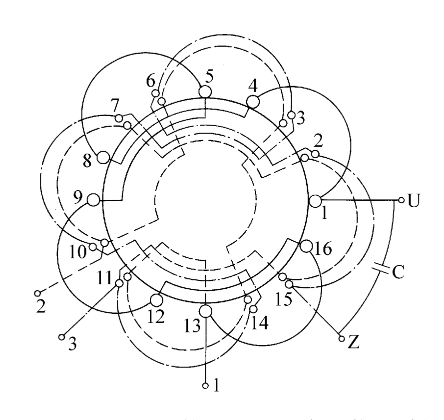


图 6-23　L-2 型 16 槽三速电机定子绕组端视图

对该绕组也采用分层整嵌，端部为三平面绕组，其嵌放顺序见表 6-11。

表 6-11　分层整嵌法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
槽号	下平面	1	4	5	8	9	12	13	16				
	中平面									15	2	3	6
嵌放顺序		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
槽号	中平面	7	18	11	14								
	下平面					15	2	3	6	7	10	11	14

（2）h 形接法

如图 6-24 所示，将调节绕组与副绕组串联起来，再并接在主绕组的抽头与电源之间。使主绕组的上、下各部分和副绕组之间形成彼此均有相位差的三个非对称电流。这样，有类似于三相异步电动机的性能。其起动性能比 L 形接法要好。

改变调节绕组的抽头位置，就调节了三个绕组间的三个非对称电流的相位差，也就相应

的改变了旋转磁场的强弱，实现了调速。

这种接法，电容器只选耐压为220V的就足够了。克服了L形接法的缺点，同时电动机在低速档的起动性能也比较好。

例如h-2型三速16槽定子绕组

h形抽头调速是由L-2调速演变而来。它是将电容器改接到主绕组中间抽头处，故称h-2型。它的原理接线图如图6-25b所示。其调速绕组与副绕组同相位，副绕组有2个线圈安排在对称位置，用庶极接线。调速绕组有2个整槽线圈和2个半槽线圈，也对称分布成两组；主绕组是显极接线，但4个整槽线圈也分成两组并对称分布于定子上，同组线圈顺向串联使极性一样，可是两组极性必须相反。电容器一端接副绕组相头Z，另一端接到主绕组抽头O点，其绕组展开图如图6-25a所示，绕组端视图如图6-26所示。

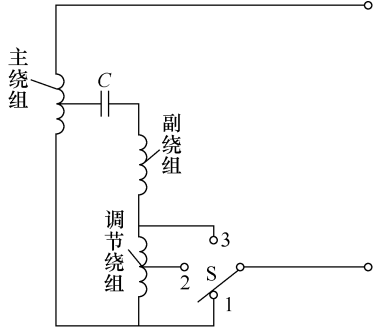


图6-24　h形接法调速线路图

此绕组虽然结构较复杂，嵌放费工时，但调速方便，性能良好，节省能源等优点。但必须指出，L型调速不能随意改成h型，绕组参数必须重新设计。

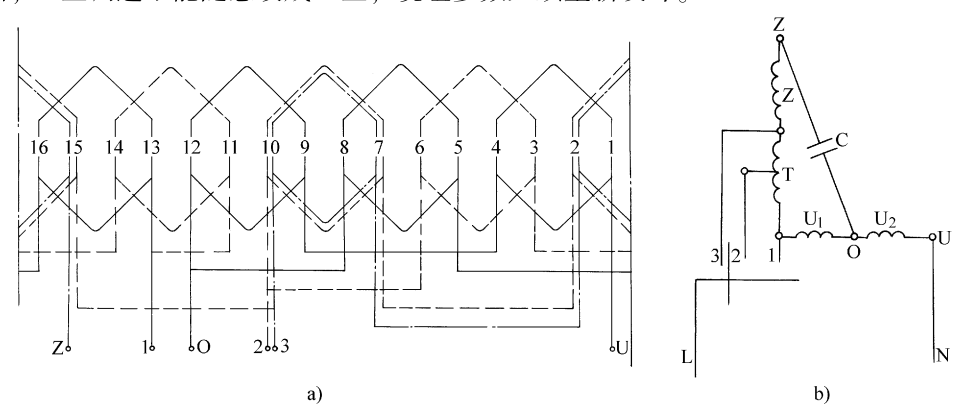


图6-25　h-2型三速16槽定子绕组展开图和接线原理图

a）绕组展开图　b）接线原理图

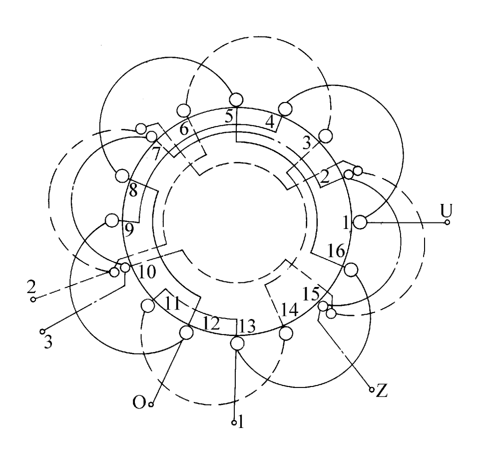


图6-26　h-2型三速16槽定子绕组端视图

对该绕组仍分层嵌放，先对称嵌放主绕组，再将调速绕组对称嵌放，最后再嵌放副绕组。嵌放顺序见表 6-12。

表 6-12 分层整嵌法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
槽号	下平面	1	4	5	8	9	12	13	16		
	中平面									15	2
嵌放顺序		10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
槽号	中平面										
	下平面	3	6	7	10	11	14	15	2	7	10

（3）T 形接法

图 6-27 所示为此种接法的原理线路图。调节绕组串接在主、副绕组并联后的回路上。

改变调节绕组的抽头，就改变了主副绕组的电压。同时，调节绕组的接入，也出现了三相非对称相位差的电流，从而具有类似三相异步电动机的性能。因此，这种接法的调速性能也比较好。

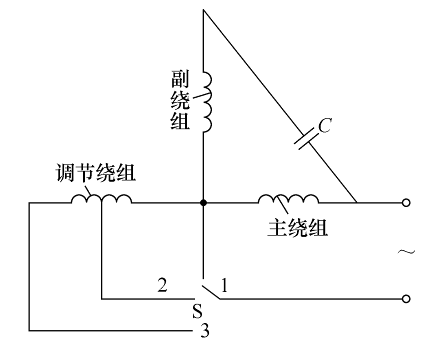
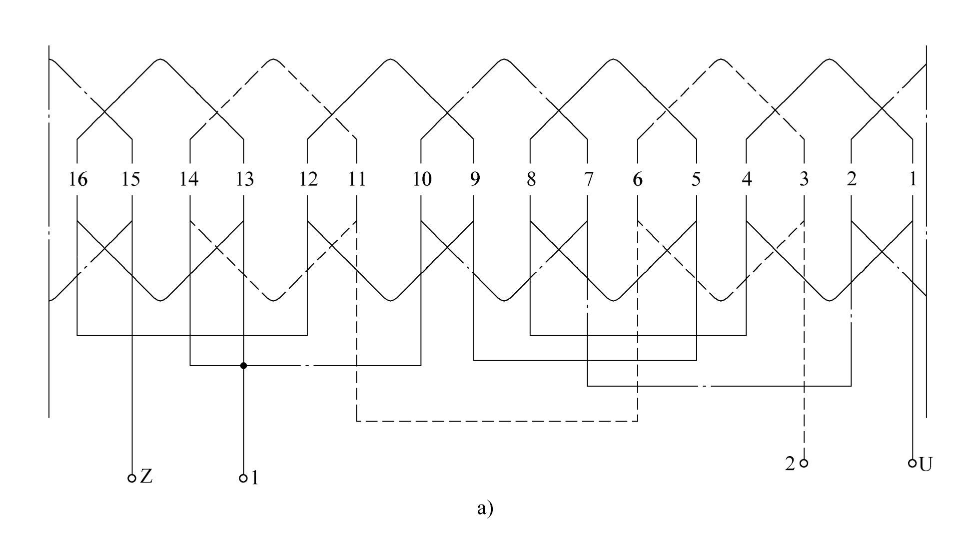


图 6-27 T 形接法调速线路图

例如 T-2W 型双速 16 槽定子绕组

该绕组的主、副、调三绕组不是嵌放于同槽内，类同单层链式绕组形如“W”。三个绕组接线形如“T”，且调速绕组和副绕组同相位，故为 T-2W 型。

三个绕组中，主绕组 4 个线圈为显极接线，“首—首”“尾—尾”相接。而副绕组和调速绕组各两个线圈，安排在对称位置，为庶极接线，“首—尾”相接。图 6-28a 所示为其展开图，图 6-28b 所示为接线原理图，图 6-29 所示为绕组端视图。



a)

图 6-28 4 极 16 槽 T-2W 型双速电动机定子绕组展开图和接线原理图

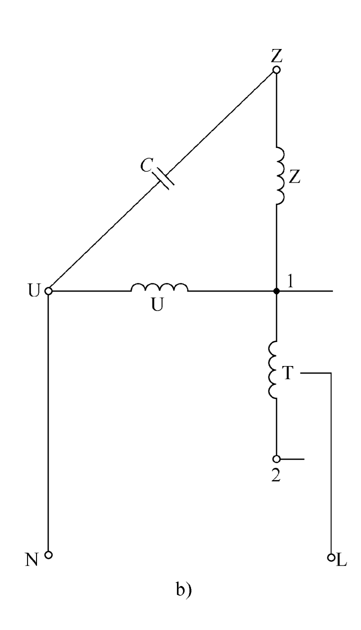


图 6-28　4 极 16 槽 T-2W 型双速电动机定子绕组展开图和接线原理图（续）

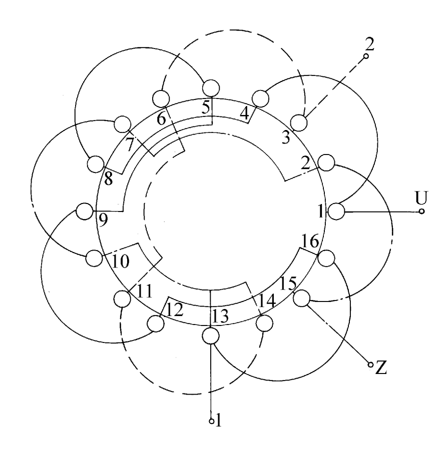


图 6-29　4 极 16 槽 T-2W 型双速电动机定子绕组端视图

对该绕组嵌放为分层嵌放法，嵌放顺序见表 6-13。

表 6-13　分层嵌放法

嵌放顺序		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
槽号	下层边	1	4	5	8	9	12	13	16								
	上层边									3	6	7	10	11	14	15	2

第四节　单相异步电动机的常见故障排除及改进

由于使用的时间过长以及客观上的非正常因素或制造、修理质量不同等原因，单相异步电动机也会出现一些故障，影响其正常运行。我们对此应及时了解，及时排除。本节对单相异步电动机最常见的故障及产生的原因在表 6-14 中列出来，供读者参考。

表 6-14　单相异步电动机常见故障表

序号	故障现象	故　障　原　因
1	电源电压正常通电后电动机不能起动	1）引线开路 2）主绕组或副绕组开路 3）离心开关的触点接触不良 4）电容器断路或短路 5）轴承卡住、缺油或装配不好 6）定、转子铁心相擦 7）过载
2	空载能起动或在外力帮助下能起动，但起动迟缓且转向不定	副绕组回路断开或接触不良： 1）副绕组中有断路 2）离心开关触点和不上 3）电容器断路
3	电动机的转速低于正常值	1）主绕组短路 2）起动后，离心开关触点断不开，副绕组没脱离电源 3）主绕组有的绕组接反或接错 4）轴承损坏
4	起动后电动机过热甚至烧坏	1）主绕组短路或接地 2）主绕组和副绕组短接 3）起动后离心开关断不开，使起动绕组长期运行发热 4）主、副绕组互相接错
5	起动后电动机过热且输入功率较大	1）电动机过载 2）绕组短路或接地 3）轴承损坏 4）定、转子铁心相擦
6	通电后，熔丝熔断，电动机不转	1）绕组短路或接地 2）引出线接地 3）电容器短路
7	电动机转动时噪声过大	1）绕组短路或接地 2）离心开关损坏 3）轴承损坏 4）电动机轴向游隙过大 5）杂物或绝缘片、导线头侵入电动机内

此外，对原来的三相异步电动机，在没有三相电源的情况下，也可改造后接在单相交流电源上使用，这里介绍以下改造的简单方法。

当定子三相绕组有六个出线端接头时，可按图 6-30 所示的接法接成电阻或电容起动，电容运转以及电容起动和运转的单相运行线路。

当三相定子绕组有三个出线端接头时，可按图 6-31 所示的接法接成电阻起动、电容起动和电容运转的Y联结和△联结的单相运行线路。

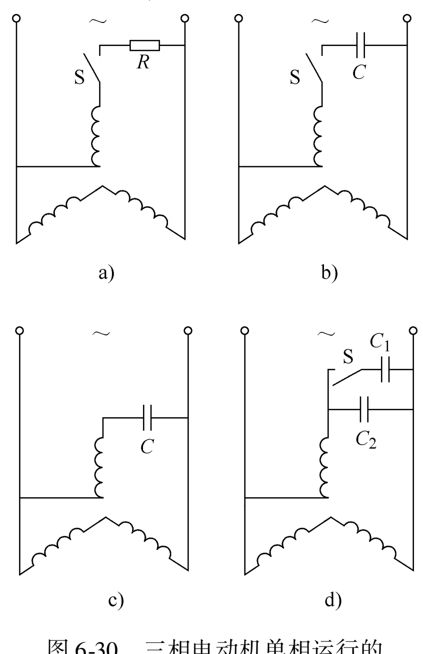


图 6-30　三相电动机单相运行的线路图（六个出线端）
a）电阻起动　b）电容起动
c）电容运转　d）电容起动和运转

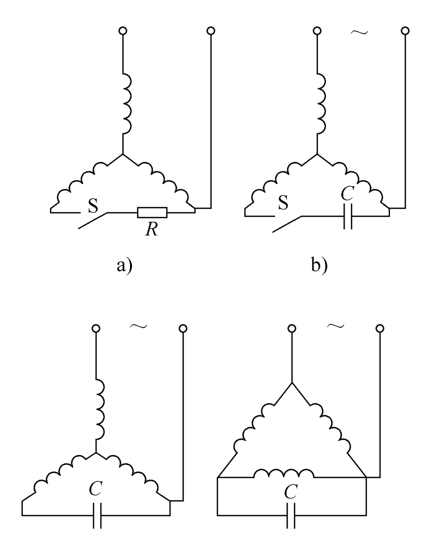


图 6-31　三相电机单相运行线路图（三个出线端）
a）电阻起动　b）电容起动
c）电容运转的Y联结　d）电容运转的△联结

改接成以上各种线路，实质上是将空间 120°电角度的三相定子绕组改接为空间互差一定电角度的两相绕组，然后通过电阻或电容进行裂相，使两相绕组的电流具有时间相位差，从而达到形成旋转磁场的目的。

对改接后的电动机，工作电容的大小可按下式估算：

$$C_2 = \frac{1950 I_N}{U_N \cos\varphi_N}$$

式中　　C_2——工作电容的电容量（μF）；

I_N、U_N、$\cos\varphi_N$——原三相电动机的铭牌额定值。

例如：一台三相异步电动机，$P_N = 1\text{kW}$，△/Y联结，$U_N = 220/380\text{V}$，$I_N = 4.2/2.4\text{A}$，$\cos\varphi_N = 0.8$。改接成单相运行线路。如接成如图 6-31c 所示的线路图，则工作电容的大小为

$$C_2 = \frac{1950 \times 2.4}{380 \times 0.8} = 15.5\mu\text{F}$$

如果接成如图 6-31d 所示的线路，则工作电容的大小为

$$C_2=\frac{1950\times2.4}{220\times0.8}=46.5\mu\text{F}$$

改接后的电动机，可接入220V的单相电源运行。

三相异步电动机改在单相电源中使用，其功率一般要下降。改接时要充分考虑到这一点。

第五节　单相异步电动机的重绕计算

对于单相异步电动机，若原来的绕组齐全，在重换定子绕组时，仍然按照原绕组的数据进行；若只有铭牌型号和主要额定数据，也可查阅同类型的电动机绕组数据重换绕组。本节主要对无铭牌和无绕组的空壳单相分相电动机重绕计算予以介绍，供读者参考。

一、主绕组计算

1）测量记录有关数据：铁心内径 D（cm）；铁心长度 L（cm）；槽形尺寸；定子槽数 Q；磁极数 $2p$。

或估算 $2p$：

$$2p=(0.35\sim0.4)\frac{Q\cdot b_t}{h_j} \tag{6-1}$$

式中　b_t——定子齿宽度（mm）；

h_j——定子铁心轭高（mm）。

2）计算极距：$\tau=\frac{\pi\cdot D}{2p}$

3）计算每极磁通：

$$\Phi=\alpha_\delta\tau LB_\delta\times10^{-4} \tag{6-2}$$

式中　α_δ——极弧系数，其值为0.6～0.7；

B_δ——气隙磁通密度（T）。

当 $2p=2$，取 $B_\delta=0.35\sim0.5T$；

当 $2p=4$，取 $B_\delta=0.55\sim0.7T$。

4）计算串联总匝数：

$$W_n=\frac{E}{4.44f\Phi K_W} \tag{6-3}$$

式中　E——绕组感应电动势（V）。

通常 $E=K_E\cdot U_e$，其中 U_e 为电动机的电源电压（如220V），K_E 是电动势系数，$K_E=0.8\sim0.94$。功率小，极数多的电动机取小值。K_W 是绕组系数。集中式绕组 $K_W=1$，单层绕组 $K_W=0.9$，正弦绕组 $K_W=0.78$。

5）计算导线截面积：在单相电动机中，主绕组导线较粗，应根据主绕组来确定槽满率。

①槽的有效面积：

$$S_c'=KS_c \tag{6-4}$$

式中　S_c——槽的截面积（mm^2），各种槽形的 S_c 计算公式见本章第三节；

K——槽内导体占空系数，$K=0.5\sim0.6$。

②导线截面积：

$$S_{m} = \frac{S_{c}'}{N_{m}} \tag{6-5}$$

式中　N_m——主绕组每槽导线数（根）。

对于主绕组占总槽数 2/3 的单叠绕组：

$$N_{m} = \frac{2W_{m}}{\frac{2}{3} \cdot Q} = \frac{3 \cdot W_{m}}{Q}$$

对于正弦绕组，N_m 应取主绕组导线最多的那一槽来计算。若该槽中同时嵌放副绕组时，则在计算 S_c'时应减去副绕组所占的面积或降低 K 值。当电动机的额定电流为已知，可按下式计算导体截面积：

$$S_{m} = \frac{I_{N}}{j} \tag{6-6}$$

式中，j 为电流密度（A/mm^2），一般 $j = 4 \sim 7$（A/mm^2）。对 2 极电动机取较小值。

6）功率估算：

①额定电流：$I_e = S_m j$。

②输出功率：$P_e = U_e I_e \eta \cos\varphi$　　(6-7)

式中　η——效率；

$\cos\varphi$——功率因数。

η 和 $\cos\varphi$ 的查取如图 6-32 所示。

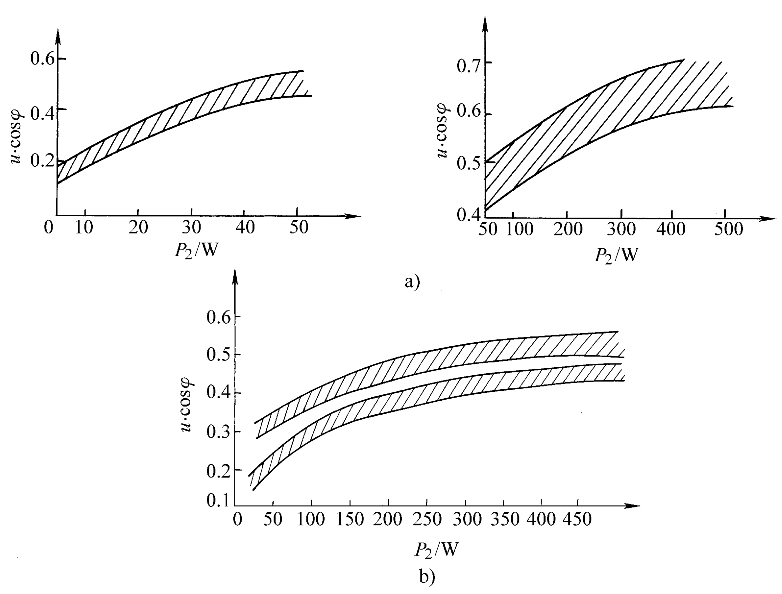


图 6-32　分相电动机的 η 和 $\cos\varphi$

二、副绕组计算

1）电阻分相和电容分相起动式电动机副绕组串联总匝数：

$$W_n = (0.5 \sim 0.7) W_m$$

导线截面积：

$$S_m = (0.5 \sim 0.25) S_m$$

2）电容运转式电动机，串联总匝数：

$$W_n = (1 \sim 1.3) W_m$$

导线截面积与匝数成反比，即

$$S_n = \frac{S_m}{1 \sim 1.3}$$

三、电容值的确定

电动机的电容值按下列经验公式确定：

1）电容起动式：

$$C = (0.5 \sim 0.8) P_e$$

式中　P_e——电动机的功率（W）。

2）电容运转式：

$$C = 8 j_n S_n \tag{6-8}$$

式中　j_n——副绕组电流密度（A/mm^2）。

一般 $j_n = 5 \sim 7A/mm^2$，电容值也可参考表 6-15 选择。

表 6-15　小功率异步电动机所需电容器的电容量

电动机功率/W	4	8	15	25	40	60	90	120	180	250	370	750
电动机磁极数	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4	2/4
工作电容容量/μF	1	1	1.2	1.2/2	2/2	2/4	4/4	4/6	6			
激动电容容量/μF								75	75	100	100	200

四、绕组的形式选择

一般尽可能用正弦绕组，正弦绕组的每槽匝数分配参见本章第二节的相关内容。少槽小容量电动机也可选择等匝单层绕组。

若按上述计算绕制的绕组结果，电动机的起动性能不符合要求，可以对电容量或副绕组进行调整。对电容式电动机，若起动转矩小，可适当增加电容值；对电阻分相电动机，若起动转矩不足，可减少副绕组匝数，若起动电流过大，可在副绕组串接适当电阻。

例：一台失去铭牌的空壳单相电动机，绕组数据不清楚，要将其重绕成电容运转式电动机的定子绕组。

解：1）测得空壳电动机上的有关数据：定子铁心外径 $D_1 = 9cm$；内径 $D = 4.8cm$；铁心长度 $L = 4.8cm$；定子槽数 $Z = 24$；定子齿宽 $b_t = 2.36mm$；槽形尺寸如图 6-33 所示，定子轭高 $h_j = 10.68mm$。

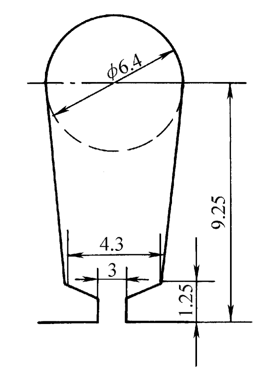


图 6-33　槽形尺寸

2）估算极数：

$$2p = (0.35 \sim 0.4)\frac{Qb_t}{h_j} = (0.35 \sim 0.4) \times \frac{24 \times 2.36}{10.68} = 1.84 \sim 2.12,$$

可知这台电动机：　　$2p=2$

3）计算极距：

$$\tau=\frac{\pi D}{2p}=\frac{3.14\times4.8}{2}=7.536\text{cm}$$

4）每极磁通：

取 $B_\delta=0.5\text{T}$，$\alpha_\delta=0.6$

$$\Phi=\alpha_\delta\cdot\tau\cdot L\cdot B_\delta\times10^{-4}=0.6\times7.536\times4.8\times0.5\times10^{-4}=10.85\times10^{-4}\text{Wb}$$

5）计算主绕组串联总匝数：

$$W_\text{m}=\frac{E}{4.44fK_\text{W}\Phi}=\frac{0.8\times220}{4.44\times50\times0.8\times10.85\times10^{-4}}=912\text{ 匝}$$

6）确定绕组的结构形式：按照绕组系数 $K_\text{W}=0.8$，每极槽数 $q=\frac{Q}{2p}=\frac{24}{2}=12$，可查表6-2得正弦绕组的分布，主绕组为5B布线，匝数比为26.8，25，16.5，10.3。其每极的线圈绕5个，从小到大的匝数分配为（1～12）：122匝；（2～11）：114匝；（3～10）：97匝；（4～9）：75匝；（5～8）：47匝。

7）槽面积：

$$S_\text{c}=\frac{d_2+b_1}{2}(h_2-h_1)+\frac{\pi d_2^{\,2}}{8}=\frac{6.4+4.3}{2}(9.25-1.25)+\frac{3.14\times6.4^2}{8}=58.9\text{mm}^2$$

槽的有效面积：

$$S_\text{c}'=K\cdot S_\text{c}=0.5\times58.9=29.45\text{mm}^2$$

8）导线截面积：

$$S_\text{m}=\frac{S_\text{c}'}{N_\text{m}}=\frac{29.45}{122}=0.241\text{mm}^2\ （取正弦绕组匝数最多的槽 N_\text{m}=122\text{ 匝}）$$

查取标准线径为 $\phi0.55\text{mm}$　$S_\text{m}'=0.238\text{mm}^2$。

9）功率估算：

$$I_\text{c}=S_\text{m}j=0.238\times4=0.952\text{A}$$

查图6-32，得 $\eta\cdot\cos\varphi=0.53$。

$$P_\text{e}=U_\text{e}I_\text{e}\eta\cos\varphi=220\times0.952\times0.53=110\text{W}$$

10）电容运转式副绕组串联总匝数：

$$W_\text{n}=(1\sim1.3)W_\text{m}=(1\sim1.3)\times912=912\sim1185$$

取 $W_\text{n}=1080$ 匝。

导线截面积：

$$S_\text{n}=\frac{S_\text{m}}{1\sim1.3}=\frac{0.238}{1\sim1.3}=0.238\sim0.183\text{mm}^2$$

取标准线径为 $\phi0.49\text{mm}$，$S_\text{n}=0.1886\text{mm}^2$。

副绕组亦按5B型正弦绕组分配匝数，其匝数比也为26.8，25，21.4，16.5，10.3，每极的线圈也是5个，从大到小的匝数分配为144，135，115，89，56。

11）电容器的选取：

$$C=8\cdot j_\text{n}S_\text{n}=8\times4\times0.1886=6\mu\text{F}$$

选 $C=6\mu F$，耐压为400V的电容器。

12）绕组计算结果：主绕组采用5B型正弦绕组，共2个极相组每极相组合5个线圈，匝数分配（从大到小）：122，114，97，75，47匝。导线用 $1-\phi0.55mm$。副绕组也采用5B型正弦绕组，2个极相组，每极相组合5个线圈，匝数分配（从大到小）：144，135，115，89，56匝。导线用 $1-\phi0.49mm$。绕组的嵌放展开图及端视图如图6-34和图6-35所示。

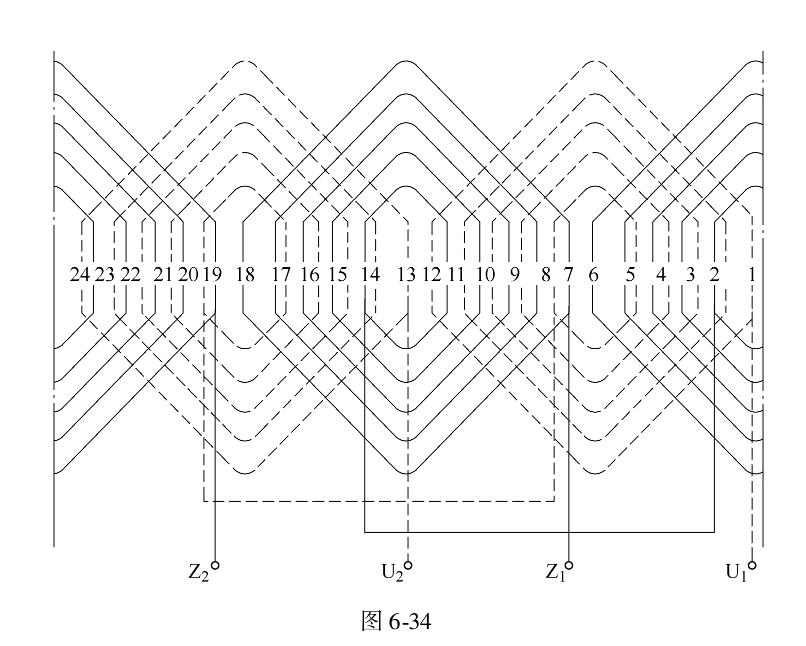


图6-34

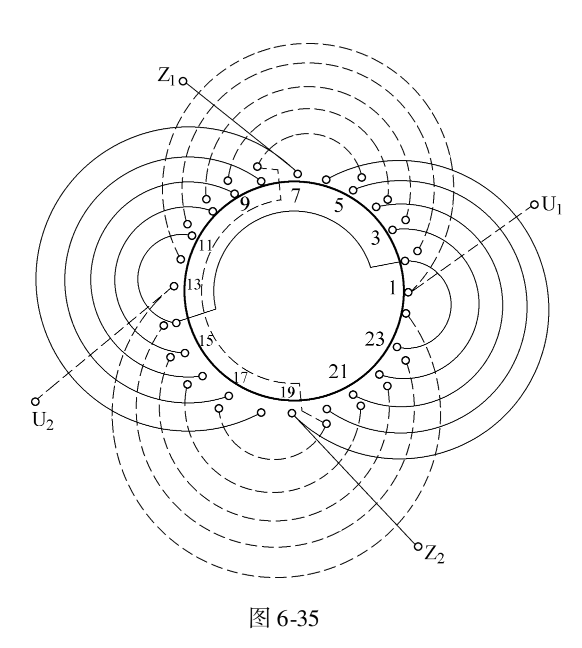


图6-35

电容器用6μF/400V无极性电容器。

本电动机的额定电压 $U_e=220V$，功率 $P_e=110W$。

第六节　单相交流串励电动机简介

单相交流串励电动机，是一种有换向器的微型交流电动机。因为它的转速特别高、起动转矩大、调速方便、重量轻，所以是工业上应用较多的微型驱动电动机之一。例如电动工具、小型机床、医疗器械、电子仪器及日用电器等，经常选用这类电动机作为动力。本节主要介绍它的结构和原理特征，以及它的工作特点和使用要点。

一、单相交流串励电动机的结构和原理

单相交流串励电动机的结构和直流串励电动机相似，如图 6-36 所示。

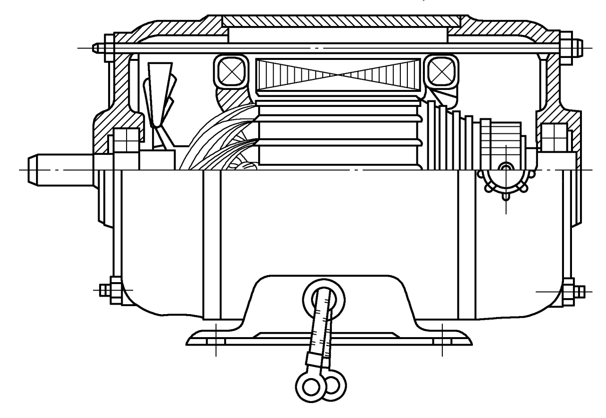


图 6-36　单相交流串励电动机结构图

它的定子上装有磁极和励磁绕组。不过磁极产生的是交变磁通，所以它的铁心用 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成。以减少磁滞和涡流引起的铁心损耗。

它的转子又称为电枢。上面由电枢铁心、绕组、转轴及换向器等组成。与一般直流电动机类同。由于这种电动机的励磁绕组和电枢绕组串联后再接通单相交流电源，所以统称为串励电动机。

图 6-37 所示为两极单相交流串励电动机的工作原理示意图。

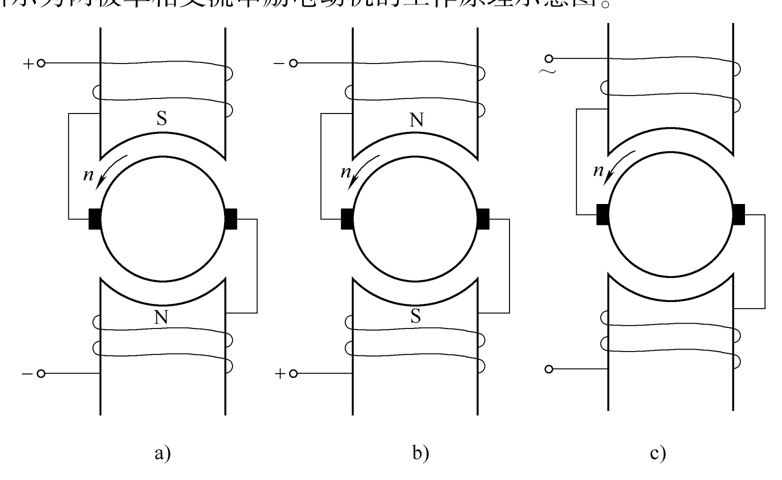


图 6-37　单相交流串励电动机原理示意图

它的工作原理是建立在直流串励电动机基础之上的。图6-35a和图6-35b是此台电动机分别通入极性相反的两种直流电源的情况。可以发现，虽然它们形成的磁极方向和电枢导体电流方向相反，但是根据左手定则判定，电枢导体受到电磁转矩方向却相同。就是说，若电压的极性改变，电动机能产生相同方向的电磁转矩而旋转。如果电动机通入的单相交流电流，此台电动机会照样运转。单相交流串激电动机就是根据这个原理制成的。

二、单相交流串励电动机的基本电磁关系

1. 电磁转矩的大小

根据载流导体在磁场中受力的原理，电动机的导体产生的电磁转矩，与磁极的磁通及电枢电流的大小成正比，同时还和电枢的几何尺寸、结构有关系。再考虑到电动机是在交流电源下工作，电磁转矩的大小是随时间变化的。因此，根据理论推导，单相交流串激电动机的电磁转矩平均值为

$$T_{\mathrm{P}} = \frac{1}{2} \times \frac{pN}{2\pi a}\Phi_{\mathrm{m}} I_{\mathrm{a}} = \frac{1}{2} C_{\mathrm{M}} \Phi_{\mathrm{m}} I_{\mathrm{a}}$$

式中　Φ_{m}——定子每极主磁通的最大值；

I_{a}——电枢总电流有效值；

p——电动机的磁极对数；

N——电枢上的总导体数；

a——电枢绕组的并联支路数；

$C_{\mathrm{M}} = \frac{pN}{2\pi a}$——电动机的转矩常数。

2. 电枢电动势的大小

电动机在旋转时，电枢导体切割定子磁场，电枢导体上又要产生感应电动势，称为电枢电动势。由于电枢电动势的方向与电枢电流方向相反，故又称为反电动势。根据电磁感应定律。又考虑到电动机在交流电源下工作的情况，单相交流串励电动机的电枢电动势有效值大小为

$$E_{\mathrm{a}} = \frac{1}{\sqrt{2}} C_{\mathrm{e}} \Phi_{\mathrm{m}} n$$

式中　Φ_{m}——定子每极主磁通的最大值；

n——电枢的转速（r/min）；

$C_{\mathrm{e}} = \frac{pN}{60a}$——与电动机结构有关的电动势常数。

3. 等效电路及电压平衡关系

单相交流串励电动机的等效电路如图5-38a所示。从图中可看到，当电动机在交流电源电压 $\dot{U}$ 的作用下，电动机产生电磁转矩 T，克服负载转矩 T_{L}，电枢以转速 n 的速度稳定运行。这时，电枢中又产生电枢电动势 $\dot{E}_{\mathrm{C}}$。同时电动机的电枢电流 $\dot{I}$ 在其回路中还产生电阻压降 $\dot{I}R$ 和电抗压降 $\mathrm{j}\dot{I}X$。于是，单相交流串激电动机的电压平衡关系为

$$\dot{U} = \dot{E}_{\mathrm{a}} + \dot{I}R + \mathrm{j}\dot{I}X \tag{6-9}$$

式中　$R = R_{\mathrm{a}} + R_{\mathrm{f}}$——电枢绕组和励磁绕组的总电阻；

$X = X_{\mathrm{a}} + X_{\mathrm{f}}$——电枢绕组和励磁绕组的总电抗；

$\dot{I}$——电动机的电流有效值。

单相交流串励电动机在铁心不饱和的情况下，铁心损耗可忽略不计。这时，$\dot{I}$ 和 $\dot{\Phi}_m$ 相位相同。电枢电动势的大小与磁通的大小成正比，所以 $\dot{E}_a$ 和 $\dot{\Phi}_m$ 相位也相同，$\dot{E}_a$ 和 $\dot{I}$ 相位也相同。此外，回路中的电阻压降 $\dot{I}R$ 和 $\dot{I}$ 同相位；而电抗压降 $j\dot{I}X$ 超前 $\dot{I}$90°。所以，根据式（6-9）可画出电动机各电磁量的相量图，如图 6-38b 所示。

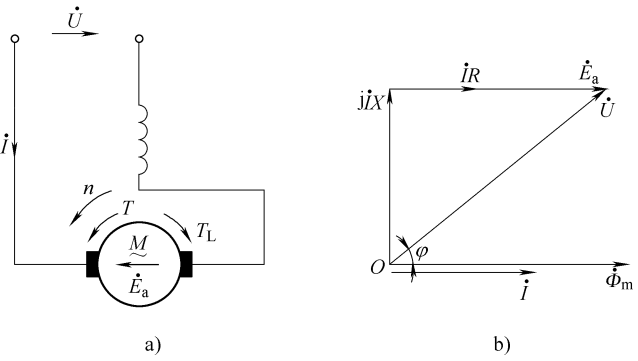


图 6-38　串励电动机的等效电路及相量图
a）等效电路　b）相量图

从相量图中可得到，单相交流串励电动机的功率因数 $\cos\varphi$ 为

$$\cos\varphi = \frac{IR + E_a}{U} \qquad (6\text{-}10)$$

三、单相交流串励电动机的主要工作特点

1. 电动机的转速高

从式（6-8）和式（6-10）可得到：

$$n = \frac{U\cos\varphi - IR}{\frac{1}{\sqrt{2}} C_e \Phi_m} \qquad (6\text{-}11)$$

电动机在设计制造时，它的额定电源电压是一定的，额定电流也是一定的。为产生足够大的转矩，要求 Φ_m 尽可能大些。但是受到铁心饱和的限制，Φ_m 也有一定的限值。另外，电阻 R 也是个变化范围不大的量值。因此，从式（6-11）可看到，在实际电动机制造时，根据 C_e 和 $\cos\varphi$ 值是决定电动机的转速的关键。为此，在实际电动机制造时，根据 $C_e = \frac{pN}{60a}$，将电枢的导体数 N 尽可能减少，使 C_e 值减少。此外，N 的减少也使电动机的电抗 X 大大减少，从而 $\cos\varphi$ 也提高了。这样，电动机的转速上升很多，通常大大超过 3000r/min。例如，G 系列单相交流串励电动机的转速为 4000 ~ 12000r/min。这是它工作中的突出优点之一。比如手电钻用这种高速电动机带动，不仅效率高，而且电动机的重量也因导体数的减少而减轻。

2. 电动机的起动转矩大

单相交流串励电动机的起动时，转速为 0，所以电枢电动势 $E = 0$，即 $\dot{U} = \dot{I}(R + jX)$。因为电源电压 U 为额定值不变，而电动机的 R 和 X 的值通常很小，因此电动机起动时的电流 I_{st} 很大。电动机中的磁通及起动转矩 T_{st} 也很大，这是它工作中的又一突出优点。

虽然它的起动电流 I_{st} 较大会引起电动机过热，但是电动机的转子体积小，惯量小，起动过程快，故此，一般不会因此而带来不良后果。

3. 电动机的机械特性较软

单相交流串励电动机的机械特性 $n = f(T_p)$ 曲线可由式（6-7）和式（6-11）可以得出。

当电动机的电磁转矩很低时，电动机的电流及每极磁通 Φ_m 也很小，这使它的转速上升很高。若其电磁转矩为0时，理论上它的转速会无穷大。随着电动机转矩增大，其电流及磁通均增大，这时，电动机的转速下降很快。其机械特性曲线如图6-39所示。由此可见，它的机械特性很软。

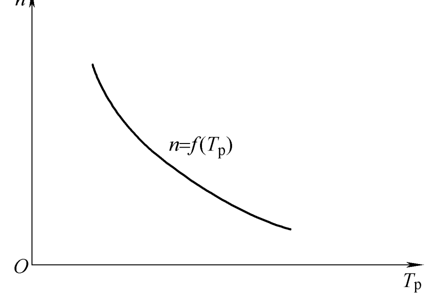


图6-39　单相串励电动机的机械特性

从电动机的机械特性曲线变化的特点可知：

当这类电动机的负载转矩突然增加时，电动机的转速会随之很快下降。这会使电动机的功率变化比较缓慢，它不容易因过载而损坏。这个特点使它适合工作在负载转矩变化较大的场合。

当电动机的负载转矩很小时，它的转速特别高。因此对这类电动机绝不能让其空载起动和运行。否则会因电动机转速过高而“飞车”。通常，电动机带的负载最低不应小于额定值的25%～30%。

4. 电动机的转速调节较方便

根据式（6-11），对单相交流串励电动机的转速调节可用3种方法：

1）改变电动机的电阻 R；

2）改变定子每极磁通 Φ_m；

3）改变电源电压 U。

在额定转速以上调节转速，一般用变阻器 R_p 与励磁绕组并联，如图6-40a所示。减少变阻器的阻值，可使电动机的励磁电流减小，进而减弱磁通量 Φ_m，这会使电动机的转速升高。这种调速方法，为了防止电机的机械损坏，一般限制其转速最大值不能超过额定转速的150%。

在额定转速以下调速，一般采用改变电压的办法。用一个双向晶闸管串接在电动机的主回路中，如图6-40b所示。控制晶闸管的导通角，可任意调节电动机的端电压，从而实现无级调速。这种调速方法可使电动机的机械特性变得硬些。

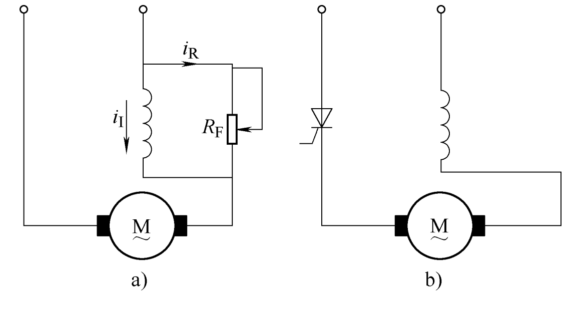


图6-40　单相交流串励电动机调速接线示意图

单相交流串励电动机的调速，在交流电机中是最简单、最方便的。这也是它的一个突出优点。

四、单相交流串励电动机的使用要点

1. 改变电动机转向的方法

单相交流串励电动机的转向一般在说明书或铭牌上都已规定好，若需要改变它的转向，只换接电枢绕组两端的接线即可。

2. 抑制无线电干扰

单相交流串励电动机在旋转时，其换向过程中所产生的火花发出高频波，对无线电会产生干扰。为抑制这种干扰，通常可采用以下方法：

1）将电动机的串励绕组分成两个相等的部分，分别接在电源和电刷之间。

2）将0.1～1μF的滤波电容器接在电动机的接线端和机壳之间。

3）采用 50 ~ 500mH 的高频扼流线圈串接在电动机的接线端与电源之间。

以上各种方法的原理可查阅有关资料，在此不再介绍。

3. 对电动机换向部分的维护

单相交流串励电动机运行是否可靠，在很大程度上取决于换向器和电刷的质量。它们的性能优劣直接影响着电动机的换向好坏。性能很差的会使电动机很快损坏。因此，对其要特别注意维护。

对换向器的表面要求一定光洁圆正，不能有灼伤或毛刷，不能变形。电刷与换向器的接触一定要保持紧密和良好，将换向时的火花降低到最小程度。对电刷已磨损的一定要修复或及时更换。

第七章　同 步 电 机

第一节　同步电机概述

一、同步电机的原理特点

同步电机也是由定子和转子两部分组成。它的定子（也称电枢）和异步电机相同，定子铁心上刻有齿和槽，槽内设置三相对称绕组。但是，它的转子装的是磁极和励磁绕组。励磁绕组通入的是直流电流，在转子上产生固定的磁场。其结构原理图如图 7-1 所示。

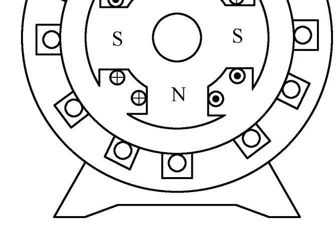


图 7-1　同步电机结构原理图

当它作为发电机运行时，原动机（水轮机、汽轮机或柴油机）拖动着转子以转速 n 旋转。这样，转子磁场则以同样的速度切割定子三相绕组，在定子绕组中即可产生三相对称的交流电动势。电动势的频率 f 则为

$$f = \frac{pn}{60} \tag{7-1}$$

式中　f——定子（电枢）电动势的频率（Hz）；

n——转子的速度（r/min）；

p——同步电机的磁极对数。

可见，当电机的结构固定后，原动机拖动转子的转速一定时，电机定子绕组电动势的频率也是一定的。

当它作为电动机运行时，在定子三相绕组上通入三相交流电流后，电机内就产生一个旋转磁场，同步转速为 n_1。这样，转子的固定磁极在定子旋转磁场的带动下，转子会沿着相同的旋转方向并以相同的转速旋转，其转速为

$$n = n_1 = \frac{60f}{p} \tag{7-2}$$

式中　f——电源电压的频率（Hz）；

p——同步电机的磁极对数；

n_1——定子旋转磁场的同步转速（r/min）；

n——转子的转速（r/min）。

由以上两式可知，同步电机无论作为发电机，还是作为电动机，转子的转速与定子绕组的电流频率保持严格不变的关系，并且和定子旋转磁场的转向及转速都相同，这种情况称为同步。这个特点是它与异步电动机的主要差别之一，也是同步电机的名称来由。

我国的电力电网标准频率为 50Hz。在此频率下，同步电机对应不同磁极对数 p 的转速为

$$n = \frac{3000}{p}$$

2 极（$p=1$）电机，转速 $n=3000\text{r/min}$；4 极（$p=2$）电机，转速 $n=1500\text{r/min}$；余此类推。一般称此转速为同步转速。

二、同步电机的分类和用途

同步电机按结构特点可分为：

1）旋转磁极式：即电枢固定（定子），磁极旋转（转子）。这种结构的同步电机，三相交流电流容易从电枢中输出或输入，这是同步电机的基本结构型式。

2）旋转电枢式：即磁极固定（定子），电枢旋转（转子）。这种结构型式只在小型或特殊用途的同步电机上采用。

按照同步电机的磁路结构可分为

1）凸极式：即磁极在转子上突出明显。极数多，转速低的同步电机多为此型式。

2）隐极式：即磁极在转子上不明显。极数少，转速高的同步电机多为此型式。

按照同步电机的用途可分为三大类：

1. 同步发电机

这是同步电机的主要用途。现代电力系统中，交流电能几乎全部是由同步发电机发出的。它又分为

1）汽轮发电机：以汽轮机作为原动机的同步发电机。它的主要特点是转速高。通常它的磁极数是 2 或 4 两种。这种发电机的电压在 0.4～27kV 之间，功率在 350～300000kW 以上。

2）水轮发电机：以水轮机作为原动机的同步发电机。它的转速一般较低。为 50～150r/min。它的电压在 0.4～20kV 之间，功率在几千瓦至 60 万千瓦以上。

3）柴油发电机：以柴油机作为原动机的同步发电机。由于发电成本高，一般作为备用电源或移动电源。它的电压在 220～6300V，转速在 250～3000r/min，功率从几千瓦到数千千瓦。

4）中频发电机：它的特点是发电频率较高。一般 f 从 100～10000Hz。小功率中频发电机用作超高速电动机及雷达等设备的特种电源。它的电压有：115V、230V、375V、750V 及 1500V 等。转速一般为 3000r/min，功率在 2～1000kW。

2. 同步电动机

由于同步电动机的功率因数可以调节，对改善电网的功率因数有重要的意义。同时，它的转速为一恒定值。所以在不要求调速或要求转速不变的机械上得到应用。它适用的电压有 3kV、6kV 及 10kV 几种。转速为 100～3000r/min，功率在 250～1000kW 以上。

3. 调相机（同步补偿机）

它是一种专门设计制造的同步电机。它的作用主要是改善电网的功率因数和调节远距离输电线路的电压。它的电压为 6.6kV、11kV 等，功率范围在 1000～50000kVA 以上。

目前，我国对同步电机的生产按用途、转速、功率以及机构型式的不同，也规划成了系列产品。各种系列产品的代号可参考附录表 A-2。

三、同步电机的主要结构特点

以旋转磁极式同步电机为例。作为电枢的定子，其结构和异步电动机的定子相同，也是在定子铁心内放置三相对称的电枢绕组，不再重述。但是，因为它的转子用来作为磁极，所以它与异步电机有明显的不同。它分凸极式和隐极式两种结构型式。

转速较高的同步电机，由于转子要承受很大的离心力作用，因此它一般用导磁性能良好的整块合金钢制成圆柱形，细而长，与轴组成一体，没有显露的磁极，故称隐极式。这种转子的外沿开有若干辐射状分布的槽，如图 7-2 所示。槽内放置励磁绕组。开槽部分约占圆周的 2/3，另外 1/3 不开槽，形成一对大齿。大齿中心就是磁极的中心。

转子的励磁绕组一般采用同心式绕组，用扁铜线绕制成形后包上绝缘嵌入槽内。两根绕组的引线接在轴伸端的集电环上，通过电刷引出。

隐极式转子结构的电机一般采用卧式安装。大多用在汽轮发电机上。

对于转速较低的同步电机，转子采用凸极式。其磁极铁心一般用 1～1.5mm 厚的钢板冲成一定形状后叠压而成。冲片形状如图 7-3 所示。叠压后固定在磁轭上。

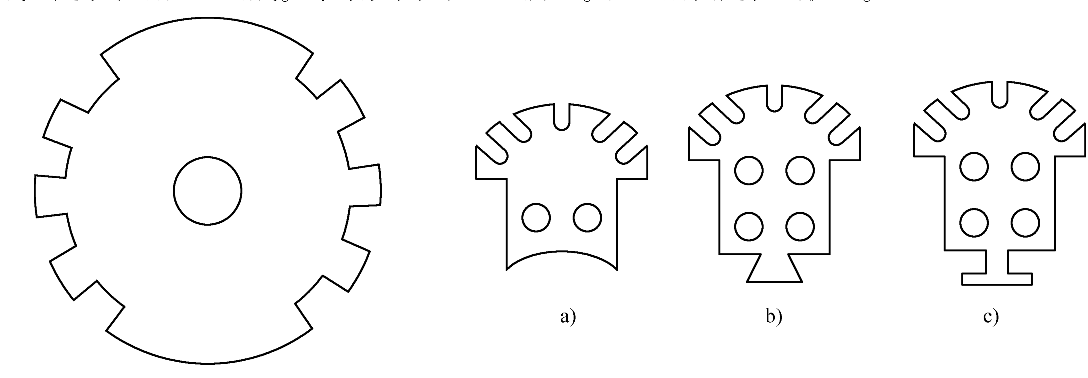


图 7-2　隐极转子的铁心冲片　　　图 7-3　凸极转子的铁心冲片

小功率的同步电机，励磁绕组用圆铜线多层绕制；大中型同步电机的励磁绕组则用扁铜带绕制而成。然后套在叠压后的极身上。

在磁极沿外圆极面上的槽中，有穿以铜条组成的笼型绕组。对于同步发电机，此绕组主要用于减少并联运行时转子震荡的幅值，称为阻尼绕组。同步电动机，此绕组主要用作电动机的起动绕组。

凸极转子结构主要用于水轮发电机、柴油发电机以及各种类型的同步发动机，除大型水轮发电机采用立式安装外，多数仍为卧式安装。

四、国产同步电机的型号及额定值

目前，我国在同步电机的制造上有了很大发展。常见的主要系列产品型号见表 7-1。

表 7-1　同步电机主要系列产品型号对照表

产品系列	型号说明	容量范围	
TF 系列	T——同步	大型	320～600000kW
	F——发电机	中型	120～320kW
T2 系列	小型同步发电机	3～200kW	
T 系列	同步电动机	大型	250～1000kW
		中型	75～400kW
TT 系列	第二个 T 表示调相机	5000～60000kvar	
TFZP 系列	中频发电机（400～20000Hz）	2～1000kW	

其他系列产品型号可参看附录表 A-2。

同步电机的额定值及技术数据，其含义分别是：

1. 额定容量 S_N 或额定功率 P_N

对于同步发电机，S_N 是指定子出线端输出的额定视在功率（以 kVA 为单位），用来确定额定电流；P_N 是指发电机输出的有功电功率（以 kW 为单位），用它可确定配套原动机的容量。

对于同步电动机，P_N 是指轴上输出的机械功率额定值（以 kW 为单位）。

对于同步调相机，以出线端的额定无功功率来表示其容量（以 kvar 为单位）。

2. 额定电压 U_N

指在额定运行时，同步电机定子端三相线电压规定值（单位为 V 或 kV）。同步发电机定子出线端一般采用Y联结，同步电动机有Y形或△形两种接法。

3. 额定电流 I_N

指同步电机在额定运行时，流过定子的线电流规定值（以 A 为单位）

4. 额定功率因数 $\cos\varphi_N$

5. 额定效率 η_N

6. 额定频率 f_N

7. 额定转速 n_N

8. 额定励磁电压 U_{fN}

9. 额定励磁电流 I_{fN}

其中几项额定值之间的关系是：

同步发电机有：
$$P_N = S_N\cos\varphi_N = \sqrt{3}U_N I_N\cos\varphi_N \tag{7-3}$$

同步电动机有：
$$P_N = \sqrt{3}U_N I_N\cos\varphi_N\eta_N \tag{7-4}$$

第二节　同步发电机

同步发电机的主要任务是将机械能转化为交流电能送给负载。它在运行中有其特点和规律。掌握这些特点和规律，才能正确的使用它。

一、同步发电机的主要特性

1. 同步发电机的空载特性

同步发电机的转子励磁绕组通入直流励磁电流 I_f 后，在发电机气隙内便产生一个磁场。当原动机拖动转子以同步转速 n_1 旋转时，这个磁场也就以同步转速旋转。我们称它为转子旋转磁场。嵌放在定子上的三相对称电枢绕组与转子旋转磁场互相切割后，则产生三相对称的交流电动势 $\dot{E}_U$、$\dot{E}_V$ 和 $\dot{E}_W$ 转子旋转磁场在空间为正弦分布，每相电动势为正弦规律变化。和异步电动机类似，每相定子电动势的大小为

$$E_0 = 4.44fNK_{N1}\Phi_f = K\Phi_f \tag{7-5}$$

式中　$f = \dfrac{pn_1}{60}$——相电动势的频率；

Φ_f——转子每极磁通；

$K = 4.44fK_N$，N——由同步电机的结构及转速所确定的常数。

同步发电机在不外接负载时，称为空载状态。此时气隙内仅转子旋转磁场，Φ_f 又称空载磁通。电枢产生的电动势 E_0 也称为空载电动势。如果改变励磁电流 I_f，考虑到发电机铁心的磁化特性，Φ_f 随 I_f 按磁化规律变化。所以定子空载电动势 $E_0 = f(I_f)$ 也将相似于磁化曲线的规律变化。空载时的同步发电机，输出端相电压 U_0 等于 E_0，故空载相电压 $U_0 = f(I_f)$ 也按 $E_0 = f(I_f)$ 规律变化。我们将 $U_0 = f(I_f)$ 称为同步发电机空载特性。曲线如图 7-4 所示。

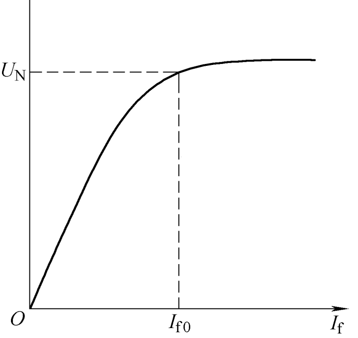


图 7-4　同步发电机的空载特性

从空载特性曲线中可以看出，同步发电机在原动机的带动下，当其转速一定后，其输出空载端电压要取决于励磁电流 I_f。考虑到发电机铁心材料的磁化特点，实际发电机的输出额定电压 U_N 及其相应的励磁电流值均选在曲线的弯曲处，我们称此处的励磁电流 I_{f0} 为正常值。

2. 同步发电机的电枢反应及其外特性

当发电机带有负载运行时，定子三相电枢绕组就有三相对称的负载电流输出。这将在发电机气隙内又产生一个旋转磁场，并以同步转速旋转。我们称它为定子旋转磁场——电枢磁场。这两个磁场以相同的转速，相同的转向旋转着，彼此没有相对运动。此时，转子磁场和定子电枢磁场之间构成了负载气隙的合成磁场。定子电枢磁场在气隙中将使气隙磁场的大小及位置均发生变化，这种影响称为电枢反应。

由于转子每极磁通 Φ_f 在定子绕组中感应的电动势 E_0 落后于 $\dot{\Phi}_f$90°，而电枢产生的每极磁通 $\dot{\Phi}_a$ 与 $\dot{\Phi}_f$ 之间的相对位置归结为研究 $\dot{E}_0$ 与 $\dot{I}$ 间的相位角。电枢反应的性质及后果主要取决与 $\dot{E}_0$ 与 $\dot{I}$ 之间的夹角和 $\dot{I}$ 的大小，即主要取决与同步发电机所带负载的性质和大小。

当同步发电机所带的负载是纯电阻性质的，其定子绕组输出的是有功电流。此时 $\dot{E}_0$ 和 $\dot{I}$ 之间夹角为零，即同相位。那么，发电机内定子产生的电枢磁通 $\dot{\Phi}_a$ 比转子每极磁通 $\dot{\Phi}_f$ 在空间始终滞后 90°，如图 7-5 所示。这使得气隙合成磁通 $\dot{\Phi}_\delta$ 也就滞后于转子每极磁通 $\dot{\Phi}_f$ 一个角度 δ_0 同时，气隙合成磁通的大小也有一定的变化。实践表明，发电机输出的有功电流越大，δ 角就越大，故称 δ 角为发电机的功率角。当 $\delta = 90°$时，发电机输出的有功电流及功率为最大值。而 δ 角不允许超过 90°。否则，转子磁场和气隙合成磁场不会同步旋转，这种情况叫电机的失步故障。同步发电机运行中不能让失步情况出现。

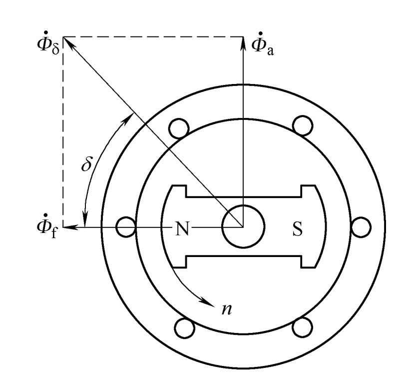


图 7-5　发电机输出有功电流时的电枢反应

当同步电机的定子绕组输出滞后性的电感电流时（即电机带电感性负载），定子产生的电枢磁通 $\dot{\Phi}_a$ 和转子磁通 $\dot{\Phi}_f$ 恰好方向相反，也就是它们在空间的相位差正好是 180°。这种情况使气隙合成磁场减弱，每极气隙合成磁通减小。这种电枢反应是属去磁性质的。其结果使发电机产生的

电动势及输出的端电压因气隙磁场减弱而下降。而且，随发电机输出电流的增大，端电压下降越严重。

当同步发电机的定子绕组输出超前性的电容电流时（即电机带电容性负载），定子产生的电枢磁通 $\dot{\Phi}_a$ 和转子磁通 $\dot{\Phi}_f$ 恰好方向相同，也就是它们在空间是同相位。这种情况使气隙合成磁场增强，磁通增大。这种电枢反应属于增磁性质的。其结果使发电机的输出端电压升高。

以上即是同步发电机带负载运行时，发电机内电枢反应的各种影响。

在同步发电机的转速为同步转速，转子励磁电流及定子所带负载的性质（即负载的功率因数）不变的情况下，它的输出电压与输出负载电流的变化关系 $U=f(I)$ 称为同步发电机的外特性，如图 7-6a 所示。

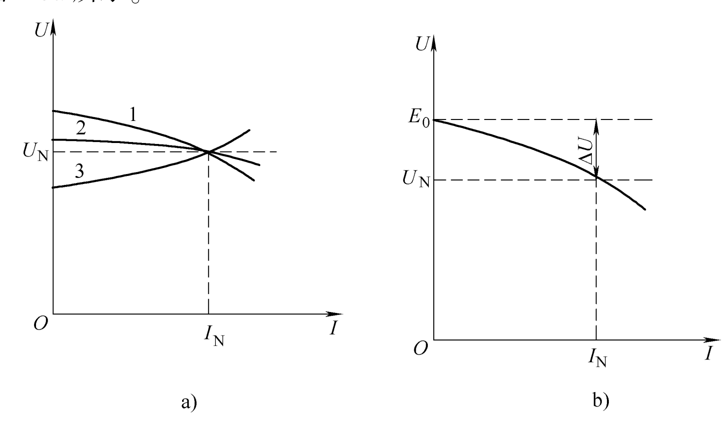


图 7-6　同步发电机的外特性及电压调整率

a）外特性曲线　b）由外特性求 ΔU

当发电机所带负载为电感性或电阻性的时候，$\cos\varphi \geqslant 0$，由于电枢反应的去磁作用及定子绕组的电阻和漏磁电抗所引起压降，发电机输出的端电压随负载电流的增大而下降，如图中曲线 1（电感性）和 2（电阻性）所示。而当电机所带的负载是电容性的时候，$\cos\varphi < 0$，电枢反应的增磁作用是主要的。因而发电机输出的端电压随负载电流的增大而上升，如图中曲线 3（电容性）所示。

为了反映同步发电机的端电压随负载电流变化情况，实际中又用同步发电机的电压调整率来表征。在额定条件下，同步发电机的空载电动势 E_0 和额定输出电压的差与额定电压的比值称为电压调整率，用 ΔU 表示。

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_N}{U_N} \times 100\% \qquad (7\text{-}6)$$

发电机带电感性负载时，ΔU 为正值；当带电电容性负载时，ΔU 为负值。ΔU 是同步发电机的一个重要技术指标。一般发电机要求 $|\Delta U|$ 在 18% ~48% 以内。如果发电机的电压调整率过高，当发电机卸去电感性负载后，或带上电容性负载时，会因电压过高使绕组绝缘击穿。

二、同步发电机的功率调节

同步发电机运行时，既向外输出有功功率，又要输出无功功率。当发电机所供的负载发

生变化时，必须及时对发电机进行调节，以保证它的正常运行和供电。这是使用发电机时经常遇到的问题。我们称为同步发电机的功率调节。

1. 发电机的有功功率调节

前面已分析过，当发电机的定子绕组输出有功电流时，电枢反应的后果是：气隙合成磁通滞后转子每极磁通一个角度 δ，转子磁通产生于转子磁极。如果将气隙合成磁通看成是由一个等效磁极产生的，那么这个等效磁极与转子磁极即是同方向、同转速旋转，而且转子磁极在前，等效磁极在后，在空间互差 δ 角。如图 7-7a 所示，如图转子磁极吸引着等效磁极一起旋转，拖动转子的原动机必须输入机械能，这就是同步电机将机械能转换成电能的过程。

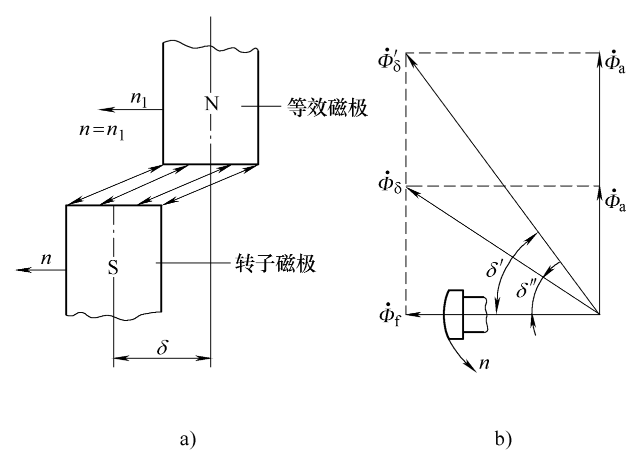


图 7-7　同步电机有功功率调节时的磁场

当同步发电机输出的有功功率增加，那么它输出的有功电流必然增大。此时，定子的电枢磁通 Φ_a 也一定增大，如图 7-7b 所示，增大后的磁通为 Φ'_a。这会导致气隙合成磁场的磁通不仅增加，而且其等效磁极与转子磁极互差的角度 δ 也要增大，如图中所示的 δ'。这样，气隙合成等效磁极会因此增加了对转子磁极的反作用力。转子磁极为了维持原来的同步转速不变，原动机输入的机械功率必须增加。所以，随着同步发电机输出的有功功率的变化，原动机输入的功率也必须随之调节，即改变汽轮机的气流量或改变水轮机的导水翼开度。

2. 发电机无功功率的调节

同步发电机的外特性告诉我们，当它带有电感性负载时，定子输出的端电压要下降；而当它带有电容性负载时，其端电压就上升。同步发电机在实际运行时，必须保持它输出的端电压为额定值不变。特别是同步发电机并联在较大的电网上供电，它的输出端电压更要保持和电网额定电压一样。为此，必须调节转子的励磁电流，保证气隙磁通不变，才能使端电压为一常值。

通常，我们将同步发电机只输出有功功率，定子端电压为额定值时的励磁电流定为正常值。若发电机再增加电感性无功功率的输出，必须增加励磁电流，发电机此时称为过励状态。如果它增加的是电容性无功功率，则必须减少励磁电流，发电机此时称为欠励状态。

由以上分析可知，当同步发电机输出无功功率时，必须调节励磁电流，才能使它所供电

的电网正常运行。这就是同步发电机的无功功率的调节。

三、同步发电机的并联运行

目前，大型的电力电网，均由多台同步发电机并联供电。小型的电网，也采用几台发电机并联后供电。这样，一方面提高了供电的可靠性，同时也提高了机组运行的效率。

需要并联运行的同步发电机在投入并联电网时，必须满足一定的条件。否则，整个机组会受到大电流的冲击或产生冲击转矩，机组受到损伤。

同步发电机并联电网合闸的条件主要有四条：

1）发电机的电压和并联电网的电压应具有相同的有效值、极性和相位。

2）发电机的频率与并联电网的频率必须相同。

3）发电机的相序与并联电网的相序必须相同。

4）发电机的电压波形与电网电压波形一致，均为正弦波。

上述条件中的4）在制造中即能得到保证。3）一般在安装发电机时，根据发电机规定的转向即可确定它的相序，容易满足。因此，发电机并联运行时，主要注意如何满足1）和2）的条件。

如果在电压不符合1）的规定下，同步发电机并网合闸，发电机和电网之间则会出现环流。特别在两者相位差较大或极性相反的情况下并网投入，产生的冲击环流可能达到额定电流的4～6倍，这是绝对不允许的。

另外，如果频率不符合2）的规定，发电机并网投入时，发电机和电网之间将出现一个大小和相位都在不断变化的拍振电压，从而会有一个拍振电流流过发电机，这使发电机可能造成严重的机械振动。

因此，同步发电机并网投入时，其电压和频率与电网都一样，这是最理想的情况。

根据上述情况，实际中同步发电机在并网投入（也称并车或整步）时，通常采用两种方法。即准整步法投入和自整步法投入。

1. 准整步法

将同步发电机调整到完全合乎投入并网条件时，然后才投入合闸。这种方法叫准整步法。

为了判断是否满足投入条件，常安装一个同步指示器。最简单的同步指示器是由三个指示灯组成，其接线如图7-8所示。

设同步发电机的相序在安装时已和电网相同。若频率不相同，那么三个指示灯会时明时暗。这时就需要调节发电机的转速，直至三个灯不再闪烁为止。接着再调节发电机的电压大小和相位。当三个指示灯同时熄灭时，电压表的指示为零，则表示发电机与电网的电压大小及相位相同，此时即可合闸。

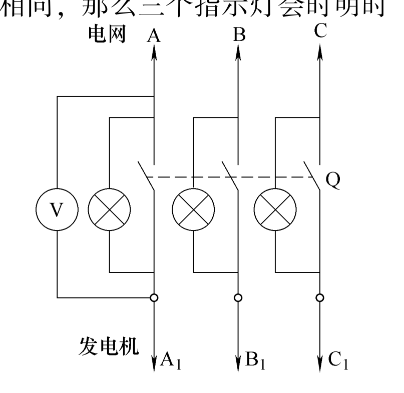


图7-8　准整步法指示灯的接法

在整步过程中，三个灯若轮流明暗，这表示发电机的相序与电网不同，此时绝对不能将发电机投入电网。

准整步法的优点是发电机和电网没有电流冲击。缺点是手续复杂，尤其在电网电压和频率有变化时，此方法投入比较困难。

2. 自整步法

自整步法投入的过程是这样的：先校对同步发电机的相序。按规定的转向（和定子形成的旋转磁场方向一致）将发电机拖到接近同步转速，然后励磁绕组经电阻短接后将发电机先投入电网，再立即加直流励磁，如图 7-9 所示。

此时，发电机的转子依靠定、转子两磁场之间产生的电磁转矩自动整步，将发电机拉入同步。

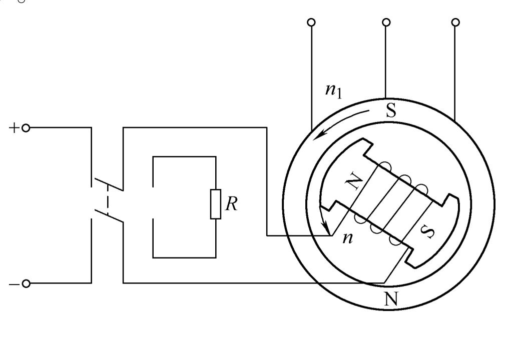


图 7-9　自整步投入法线路图

在自整步操作时应该注意，发电机投入电网时，励磁绕组绝不能开路，以免绕组中产生很高的感应电动势。但是励磁绕组也不能自行短接，否则合闸时定子上会有很大的冲击电流。因此通常利用灭磁电阻 R 接入励磁回路中，起限流作用。另外，自整步作用，只有转子转速接近同步转速时才能发挥作用。如果转子转速离同步转速较远，由于转子的惯性，有时将不能被拉入同步，这会引起电流冲击，对发电机和电网会产生不良后果。

自整步法的优点是操作简单、并车迅速、方便。缺点是合闸及加入励磁时有电流冲击。这种方法普遍用于事故状态下的并车。

第三节　同步电动机及调相机

一、同步电动机的电枢反应及运行特点

同步电动机运行时，它的定子电枢绕组从电源上吸取三相交流电流，产生定子旋转磁场。这个磁场带着经过励磁的转子磁极以同步转速旋转。从而实现了由电能转换为机械能的过程。和同步发电机相似，同步电动机在运行中，气隙中也同时存在着转子旋转磁场和定子旋转磁场。这两个磁场之和构成了气隙合成磁场。而且随着电动机从电网上吸取的电流的变化，定子旋转磁场使气隙磁场的大小及位置发生变化。这种影响亦为同步电动机的电枢反应。

理论上分析和实践证明，当同步电动机所带的机械负载增加时，定子绕组向电源上吸取的有功电流增大。此电流所产生的定子旋转磁场虽然和转子磁场以相同方向、相同转速旋转，但是定子旋转磁通 $\dot{\Phi}_a$ 却在空间超前转子旋转磁通 $\dot{\Phi}_f$ 一个角度 δ_m（$\delta_m<90°$）。并且，随着输出的有功电流增大，δ_m 亦增加。δ_m 的增加亦使气隙合成磁场对转子磁极的磁拉力增大，电动机产生的电磁转矩增大。当其电磁转矩和增大后的机械负载转矩达到平衡时，同步电动机又重新在同步转速下运行。同步电动机吸收有功电流时的电枢反应情况，如图 7-10 所示。

上述情况表明，同步电动机所带的机械负载变化时，其电枢反应的结果使它的电磁转矩及其从电网上吸取的电功率均随着变化。但是，电动机的转速仍为同步转速不变。这是同步电动机的一个突出特点。因此其机械特性 $n=f(T)$ 曲线为一恒定的水平直线，如图 7-11 所示。同步电动机的这一特点，使它正适用于一些要求不调速的或恒速旋转的机械上应用。

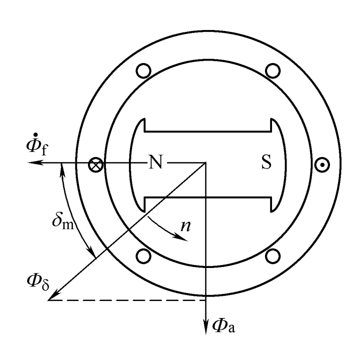



图 7-10　同步电动机吸收有功电流时的电枢反应

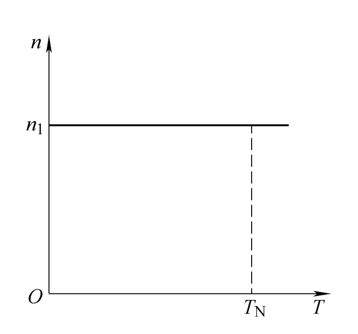


图 7-11　同步电动机的机械特性

要注意的是，同步电动机产生的电磁转矩也有极限值（最大值）T_{max}。理论分析知道，T_{max}产生于$\delta_m=90°$时。若δ_m超过90°，同步电动机就出现失步现象，即电动机的转速不再为严格的同步转速。这在实际中是不允许的。因此，工程上用过载倍数$K_m=\frac{T_{max}}{T_N}$作为同步电动机的一个重要技术指标。一般，$K_m=2\sim3.5$。

二、同步电动机的功率因数调节

和同步发电机一样，如果同步电动机的定子绕组从电网上吸取一个超前性的电容电流（相当于同步发电机向电网上输出一个滞后性的电感电流），其定子电枢产生的磁场使气隙磁场消弱，起去磁作用。若其定子绕组从电网上吸取一个滞后性的电感电流（相当于同步发电机向电网上输出一个超前性的电容电流），它产生的定子磁场使气隙磁场增强，起增磁作用。上述电枢反应结果使同步电动机产生的三相定子电动势的大小受到影响。而其定子电动势主要是和电网电压平衡的。若电网的电压一定，电动机的定子电动势大小是不能改变的。实际中，同步电动机在运行中，电网电压一般均为额定值不变。这样，电动机内的气隙磁场及定子电动势也必须保持常值不变。为此，当同步电动机从电网上吸取容性电流时，转子必须增大励磁电流，电动机工作在过励状态；而当同步电动机从电网吸取感性电流时，转子必须减少励磁电流，电动机工作在欠励状态。

根据上述理论，同步电动机通过改变励磁状态，就可调节自身的负载性质，即改变自身的功率因数。电动机工作在过励状态时，它就相当于一个电容性负载，其功率因数$\cos\varphi$是超前性的。若其工作在欠励状态时，它就相当于一个电感性负载，其功率因数$\cos\varphi$是滞后性的。当电动机正常励磁时，它基本上从电网中不吸取任何无功功率，相当于一个阻性负载，$\cos\varphi=1$，同步电动机的功率因数的自身可调性是其突出特点之一。此点是异步电动机办不到的。

由于电网上所带负载的大部分是滞后性的感性负载，若让同步电动机作为容性负载工作，这对提高电网的功率因数是很有利的。因此，实际中使用同步电动机时均让其在过励磁状态下运行，至少运行在正常励磁状态下。同步电动机的这个突出优点，使其在不要求调速的大功率机械上得到广泛应用。

三、同步电动机的起动

同步电动机在同步转速下稳定运行时，定、转子磁场相对静止，才能产生单一方向的电

磁转矩。而当电动机起动时，若将其直接接入电源，则产生的定子旋转磁场瞬间即达同步转速。但是由于机械惯性，它的转子则不能马上转起来。开始的瞬时，转子静止不动，这就使定、转子磁场之间有很大的相对运动转速。每相对运动一对磁极的距离，定子旋转磁场对转子磁极的作用力矩方向就改变一次。因为相对转速大，对转子的作用转矩平均为零，因而同步电动机不能自行起动。必须采取特殊方法才能使同步电动机顺利起动。

常用的起动方法有 3 种：

1）辅助电动机起动法；

2）变频起动法；

3）异步起动法。

这里主要介绍最常用的异步起动法。

同步电动机的转子极靴圆弧表面上，装有和异步电动机类似的笼型短路绕组——起动绕组。当电动机开始接电源后，此起动绕组在定子旋转磁场相互作用产生异步电磁转矩，同步电动机便作为异步电动机而起动。当同步电动机的转速达到同步转速的 95% 左右时，将励磁绕组与直流电源接通，给予直流励磁。这时，定、转子两个磁场相对转速很低，转子将被定子旋转磁场吸引住，使它跟着定子旋转磁场以同步转速旋转，即所谓牵入同步。

要特别注意的时，异步起动时，励磁绕组不允许开路。否则，由于励磁绕组匝数很多，定子旋转磁场将在该绕组上感应出很高的感应电压，可能击穿励磁绕组的绝缘，这是很危险的。但是，励磁绕组在起动时也不能自行直接短路，不然励磁绕组中将感应一个较大的单相电流，这一电流将产生较大的附加转矩，其特点是在略大于半同步转速处产生较大的负转矩，可能把同步电动机“卡住”在半同步转速附近运转，不能继续升速。为此，电动机起动时，励磁绕组中串入一附加电阻后再短接。附加电阻值约为励磁绕组电阻的 5～10 倍。当电动机起动至接近同步转速时，切除附加电阻，通入直流，完成起动过程。异步起动接线原理图如图 7-12 所示。

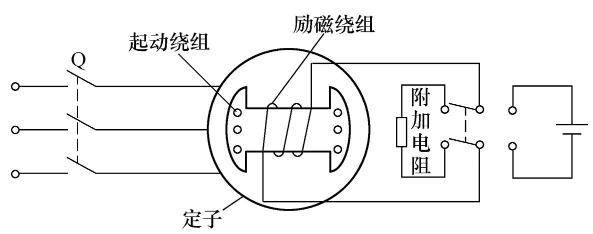


图 7-12　异步起动接线原理图

同步电动机一般起动时，和异步电动机一样为了限制过大的起动电流，可以采用减压方法起动。通常采用自耦变压器或电抗器来降压，当电动机的转速达到某一定值后，再恢复全电压，最后给予直流励磁牵入同步。

因为同步电动机起动的操作过程比较复杂，而且要求有足够的精确度。所以，目前同步电动机普遍采用晶闸管励磁系统，它可使同步电动机的起动过程实现自动化，还可以使其顺极性自动投励。

四、同步调相机

同步调相机的主要作用是：将它接在电力电网中，改善电网的功率因数和调节远距离输

电线路的电压。它的工作原理和同步电动机基本相同。但是，由于其作用不同于电动机，所以它的运行有其特点。

1）它的定子绕组和其他同步电动机一样，接通电网三相电压。而其转子轴既不和原动机相联，也不带机械负载。它正常运行时，为了补偿自身的损耗才从电网上吸取很少量的有功电流。即相当于同步电动机的空载状态。

2）同步调相机一般接在电网的受电端。由于电网上通常带有大量电感性负载，如异步电动机、变压器等。当电网满负荷时，功率因数较低。此时调相机便工作在过励状态，相当于一个电容性负载。这样，它从电网吸收容性电流，相当于向电网提供感性无功功率，补偿电网的需要，从而改善了电网的功率因数，减少了输电线路的损耗，提高了发电设备的利用率。

3）当电网上出现轻载或空载时，较长的输电线路具有线路电容，使电网的功率因数超前。容性电流使发电机产生增磁作用，会引起电网电压升高。为使电网电压不过分升高，调相机又工作在欠励状态，抵消线路电容的作用，稳定了电网电压。

由于调相机具有上述特点，它的结构和同步电动机相比也有不同：因为它不带机械负载，所以其转子轴较细；为了尽量增加它的滞后性无功功率输出，它的励磁绕组导线截面较大，以通过较大的励磁电流。

同步调相机的起动和同步发电机一样，也采用异步起动法。

第四节　中频发电机及变频机

中频发电机是能产生单相或多相中频交流电能的特种同步发电机。中频范围为 $50\text{Hz} \leqslant f \leqslant 20000\text{Hz}$。

中频发电机主要用来作金属感应加热炉和高速电动机的电源，汽轮发电机的交流励磁机，以及林业、矿业、地质和其他部门中需要中频电源的场所。

要获得高于50Hz的交流电能，可以通过增加一般同步发电机的磁极数或提高原动机的转速来实现。但是，如果电能的频率高于400Hz，采用上述方法就有困难。目前，400～20000Hz范围内的电能，广泛采用感应子式中频发电机来获取。

一、感应子式中频发电机的原理特点

感应子式中频发电机的励磁绕组和电枢绕组都装在定子槽内。转子上没有绕组，只开有规定的齿槽，通常称为感应子。根据定、转子之间的齿距和齿数的关系，又分为倍齿距和等齿距两种结构型式。

1. 倍齿距式感应子发电机的工作原理

图7-13所示为倍齿距式感应子发电机的工作原理。

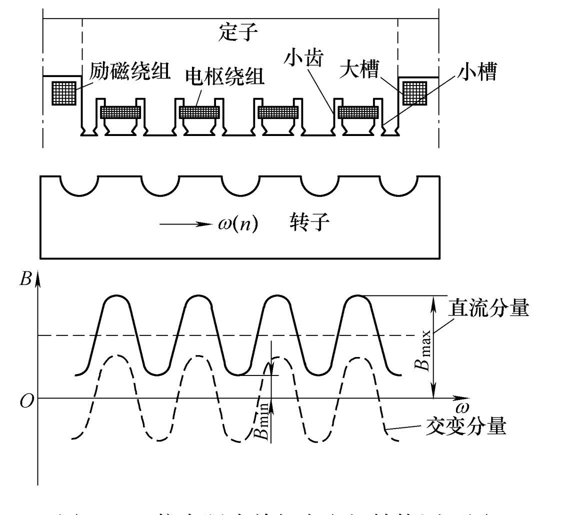


图7-13　倍齿距式单相发电机结构原理图

该发电机的转子外圆只开有一种槽，均

匀分布。定子上冲有两种槽：大槽和小槽。大槽一般有4或6个，沿圆周均匀分布，大槽内嵌放励磁绕组。励磁绕组通以直流后，在定子内腔形成极性交替的磁场。每两个大槽之间又均匀分布有若干个小槽，其槽齿距和转子的槽齿距相同。小槽内嵌放电枢绕组。中频电能就是从这个电枢绕组中发出的。

图7-13下侧画出发电机气隙中磁密的分布情况曲线。由于转子齿槽的存在，各处的磁阻不同。所以，在转子齿范围内的气隙磁通密度较高，而在转子槽范围内的磁通密度较低。磁通在空间圆周方向上的分布有周期性。若将气隙磁通分解，则可分为一个恒定分量和一个交变分量。其中，交变分量磁通的分布周期相当于一个转子的齿距。也就是说，转子的一个齿距相当于一对“中频磁极”。这样，转子上有 Z_2 个齿的感应子发电机。就相当于一台具有 Z_2 对磁极的同步发电机。当转子以恒定的转速 n 旋转时，磁通的交变分量在电枢绕组内所感应的电动势频率 f 则为：

$$f=\frac{Z_2 n}{60}$$

式中　f——发电机输出的电压频率（Hz）；

Z_2——转子的齿数；

n——转子的转速（r/min）。

倍齿距式三相中频发电机中，每个槽的齿距范围内（即一对中频磁极范围内）。定子上有 K_Z 个齿，$K_Z=3$ 或 $K_Z=6$。上面嵌放三相电枢绕组，如图7-14所示。

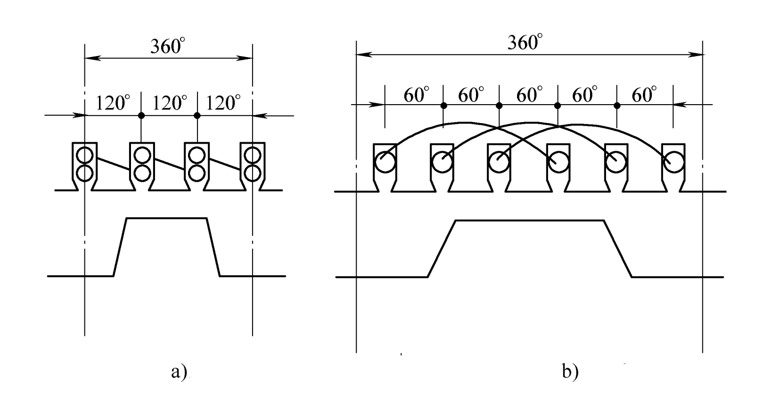


图7-14　K_Z 不同的三相中频发电机电枢绕组

a）$K_Z=3$　b）$K_Z=6$

由于三相电枢绕组在空间互差120°电度角，所以当转子旋转时，各相电枢绕组中产生的电动势相位差必然互差120°的时间电角度，即可获得三相对称的中频电动势。

倍齿距式发电机发出的电压频率范围，单相发电机约为4000Hz及以下；三相发电机约为2000Hz及以下。

2. 等齿距式感应子发电机的工作原理

这种发电机在结构上，其转子部分和倍齿距式发电机完全相同。主要的特殊结构是：它的定子有大、中、小三种槽。大槽内嵌放励磁绕组；两个大槽之间均匀分布着4~8个中槽，

槽内嵌放电枢绕组；两个中槽之间又有若干个小槽。小齿的齿距和转子齿距相等，如图7-15所示。而且，当中齿1上的小齿和转子齿相互对齐时，结构上保证其相邻中齿2上的小齿正好与转子槽相对。

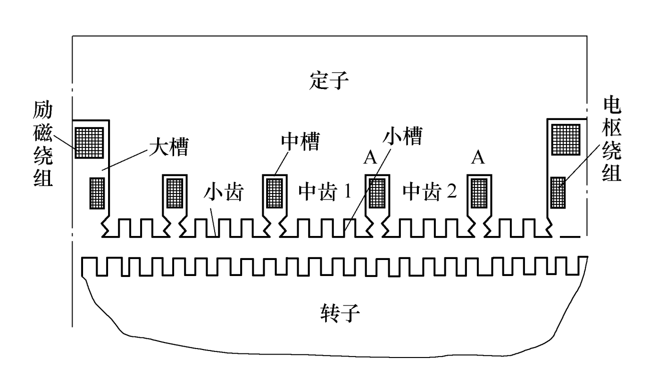


图7-15　等齿距式中频发电机结构原理图

当转子以恒定转速旋转时，被电枢绕组线圈A包围的中齿2中的总磁通产生脉振。时而为最大值 $Z_0\Phi_{\min}$（Z_0——每个中齿内的小齿数）。中齿2中磁通的交变分量若随时间变化，则线圈A就产生感应电动势，其频率和倍齿距相似，取决于转子齿数及转速。

三相电动势的发出（即三相中频发电机），主要取决与定子大齿上嵌放的绕组型式。和倍齿距原理结构一样，嵌放三相绕组即可。

等齿距式中频发电机发出电压的频率范围，单相发电机约为4000～10000Hz（有的可达到20000Hz）；三相发电机约为2000Hz以上。

二、变频机

变频机是将工频电源（或直流电源）变为中频电源的机组。这种机组一般是由电动机和中频发电机同轴同机座的组合结构。它分立式和卧式两种。对一般用的小型变频机都制成防护式，而对感应加热用的变频机大部分做成封闭式。变频机一般选用异步电动机作为拖动电机。如果对频率有严格的要求，拖动电机可选用同步电动机或转速可以自动调节的直流电动机。

机组中的中频发电机，以及发电机与异步电动机配套的额定电压等，选择范围见表7-2。

表7-2　变频机的发电机和电动机配套参考表

发电机额定功率/kW	40～250(320)	250(200)～1000
发电机额定电压/V	375/750	750/1500
电动机额定电压/V	380	6000(3000)

感应加热用的变频机，因为所带的负载属于电感性的，所以使用的时候在发电机输出端必须并联相当数量的电容器，以保证变频机的额定功率因数。此外，对此种变频机，由于容量较大，而且工作环境的温度较高，所以通常它采用水冷系统。即在机组外壳和定子铁心内

装有水冷循环的管道。

变频机及中频发电机并联运行的投入条件与普通工频同步发电机相同。中频发电机很容易牵入同步转速。虽然它在运行中比较容易失步，但是失步时对电机本身及负载都不会产生严重的后果。

由异步电动机拖动的中频发电机，并联运行时各发电机间输出功率的分配是否合理，主要取决于异步电动机机械特性的差别程度。所以，一般都选择特性相近的异步电动机配套才能并联运行。

中频发电机因为转子没有绕组，因此结构简单，维护方便。但是，此类发电机中气隙磁通的利用率较低。只有磁通的交变分量被利用产生感应电动势，所以它的结构尺寸比同功率的工频同步发电机要大。

第五节　微型同步电动机

微型同步电动机的转速和同步电动机一样，恒为同步转速 n_1。它的结构更简单，容量更小。此类电动机主要适用于转速要求一定的小型机械装置中。例如记录仪表装置、时间机构、电唱机、录音机、电视设备等。

微型同步电动机的定子结构与异步电动机一样，有三相或单相的。它的转子结构特殊，转子的磁极数仍和定子的磁极数相同，但其结构型式分为 3 种：永磁式、反应式和磁滞式。

一、永磁式微型同步电动机

永磁式微型同步电动机的转子结构是由磁钢做成的永久磁极。N、S 极沿圆周方向交替排列，形成转子磁场。它的定子旋转磁场是由定子三相对称绕组或单相主、副绕组或单相罩极产生的。当其定子旋转磁场以 n_1 同步转速旋转时，转子的永久磁极则被吸引随之同步旋转。

和同步电动机一样，当功率角 $\delta_m=0$，电磁转矩 $T=0$；当 $\delta_m=90°$时，$T=T_{max}$（最大值）功率角 δ_m 随输出功率的大小而变化。

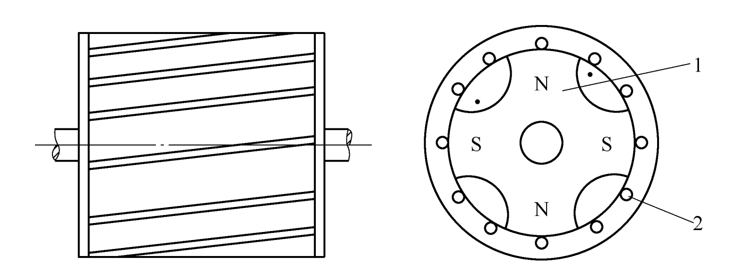


图 7-16　永磁式微型同步电动机的转子

1—永久磁铁　2—起动绕组导条

永磁式微型同步电动机多数也采用异步起动，为此，它的转子上同样装有笼型起动绕组。如图 7-16 所示，是这种电动机永磁钢径向结构型式的永磁转子。

这类电动机的特点是功率因数和效率较高，有效材料的利用率较好，和同体积其他类型的同步电动机比较，输出功率较大。

二、反应式微型同步电动机（也称磁阻式）

反应式微型同步电动机的转子是由铁磁材料制成的。转子铁心上冲制成一定形状的反应槽，使其直轴和交轴两方向的磁阻有较大的差异。直轴方向的磁阻最小，交轴方向的磁阻最大，它们在空间互差 90°的电度角。冲片形状如图 7-17 所示。转子上没有励磁绕组，只设有供电动机起动用的笼型绕组。

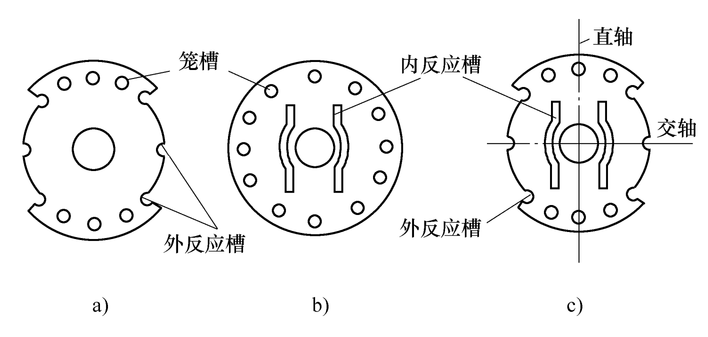


图 7-17　反应式同步电动机的转子冲片

a）外反应式　b）内反应式　c）内外反应式

图 7-18 所示为反应式微型同步电动机的工作原理图。图中，定子产生的旋转磁场用一对以同步转速 n_1 旋转的等效磁极来表示。

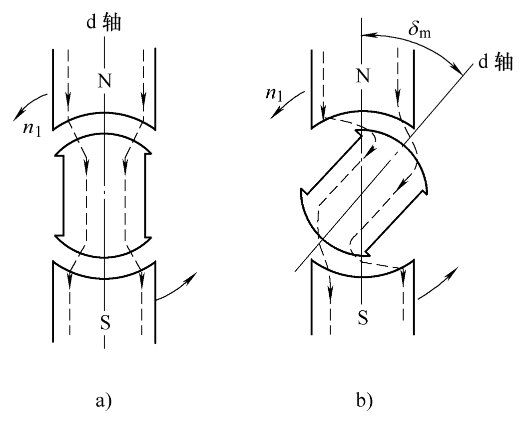


图 7-18　反应式同步电动机原理图

a）$\delta_m = 0°$　b）$\delta_m = 45°$

反应式电动机同步运行时，当转子的直轴 d（即转子凸极轴线和定子旋转磁场轴线间的夹角 δ_m（功率角）为零时，磁路的磁阻最小，磁力线最短，气隙磁场没有歪扭现象，电动机的磁阻转矩为零，见图 7-18a 所示。此时电动机为理想空载状态。转子带上负载后，转子的直轴对定子旋转磁场轴线滞后一个功率角 δ_m，气隙磁场被歪扭，如图 7-18b 所示。磁力线所经路径被拉长，磁阻增大。被拉长的磁力线力图缩短所经路径，减小磁阻，于是产生了电磁转矩——磁阻转矩。这个转矩与负载转矩相平衡，电动机处于稳定运行状态。负载增大时，功率角 δ_m 增大。当 $\delta_m = 45°$电角时，电动机出现最大的磁阻转矩 T_{max}。当负载继续增大时，磁阻转矩反而减小。当 $\delta_m > 45°$，电动机将失步进入异步运行状态。

反应式同步电动机均采用异步起动。按定子结构分为三相和单相两种。在同体积的情况下，三相反应式同步电动机比单相反应式同步电动机的功率高出 1/3 ~ 2/3。单相反应式同步电动机又分为电容起动、电容运转、电容起动和运转 3 种。由于它们具有结构简单、无滑动接触、制造简单、过载能力大、不易失步、运行可靠等优点，因此应用较为广泛。表 7-3 列出各种反应式同步电动机的主要技术数据、特性及适用范围。

表 7-3 反应式微型同步电动机主要性能和适用范围

电机名称	反应式(磁阻式)同步电动机			
	三相	单相		
		电容起动	电容运转	电容起动和运转
接线原理图				
机械特性				
功率范围/W	15～75	60～370	25～90	90～550
电压/V	380	220	220	220
频率/Hz	50	50	50	50
转速/(r/min)	1500,3000	1500,3000	1500,3000	1500,3000
适用范围	具有较高的起动转矩和较大的输出功率,适用于精密机床,录音机、电影设备等	具有较高的起动转矩,适用于复印机等	起动转矩较低,但有较高的功率因数和效率,噪声小,适用于仪器仪表中	起动转矩较高,且有较大的功率因数和效率,噪声小,适用于摄影机、光学仪器中

三、磁滞式微型同步电动机

磁滞式微型同步电动机的转子是由硬磁性材料制造的。其定子和其他微型同步电动机一样。它是利用磁滞作用产生转矩的同步电动机。

硬磁材料的磁滞现象非常显著，其磁滞回线宽，剩磁与矫顽力的值很大。硬磁材料被磁化时，阻碍磁分子运动的相互摩擦力甚大。硬磁材料在交变磁化时，磁滞现象表现为其磁通密度 B 滞后于磁场强度 H 一个时间角。

磁滞式微型同步电动机就是靠转子的磁滞现象产生的磁极和定子旋转磁场互相作用，产

生转矩而运行的。

图 7-19a 所示电动机的转子是一个硬磁材料制成的实心圆柱体。当大小不变的定子磁场在空间固定不动时，转子处于恒定磁化状态。转子上的磁分子沿定子磁场方向排列，转子磁场和定子磁场方向一致。转子所受的电磁转矩 $T=0$。

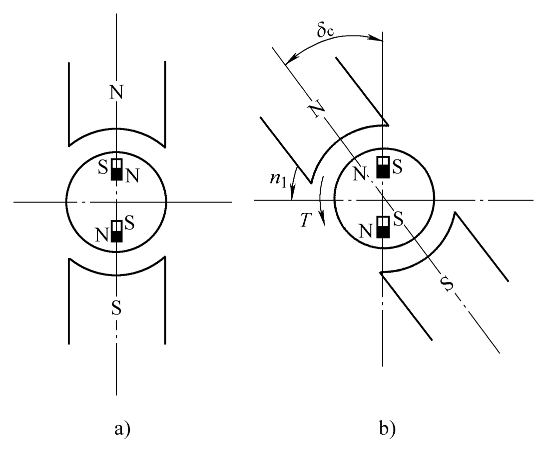


图 7-19　硬磁材料的转子磁化情况

当定子磁场在空间旋转时，如图 7-19b 所示。转子处于旋转磁化状态。转子上的磁分子要不停的改变方向，力图使其与定子磁场方向保持一致。但由于硬磁材料的磁滞特性，不能使它即刻跟上定子旋转磁场，而是始终落后于定子磁场一定的空间角度 δ_c，δ_c 称为磁滞角。磁滞角 δ_c 的存在使转子受到一个转矩 T_c，T_c 的方向和定子磁场旋转方向相同。T_c 称为磁滞转矩。在 T_c 的作用下转子以同步于定子磁场的转速旋转。

磁滞式同步电动机中，当定子旋转磁场一定时，转子磁滞角 δ_c 的大小只取决于硬磁材料的磁化特征，所以 δ_c 和 T_c 都是常数，与旋转磁场的转速无关。因此，此类电动机在起动时磁滞转矩 T_c 仍然存在，使电动机能自行起动，而且起动转矩比较大。这是它的一个突出优点。

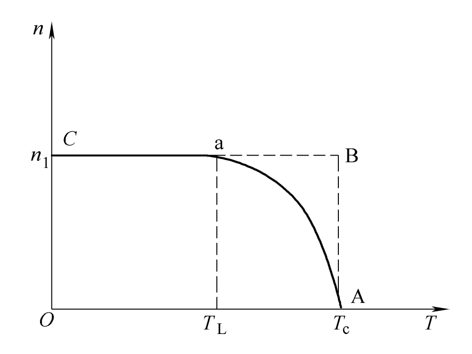


图 7-20　磁滞式同步电动机的机械特性

磁滞式电动机的机械特性在理想时如图 7-20 所示。当负载转矩为 T_L 时，工作点在 a 点，aC 为运行段。最大负载转矩 T_{max} 要小于 T_c。

磁滞式同步电动机的转子，多数采用环形硬磁材料，用冲片迭压而成，或用整块铸造而成。里面有一个套筒，如图 7-21a 所示。

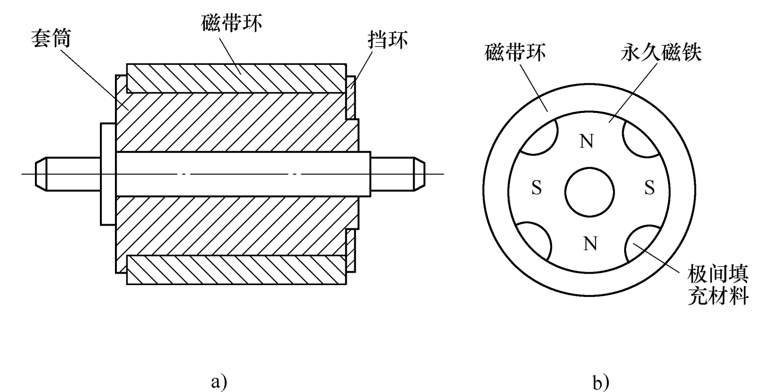


图 7-21　磁滞式同步电动机的转子

若在永磁式电动机转子的永久磁极外圆上，再装上硬磁材料的磁滞环，如图 7-21b 所示。这样，电动机既能产生较大的起动转矩，又能增加运行时的同步转矩，比笼型异步起动要优越得多。

功率较小的磁滞式同步电动机，定子可采用罩极结构。它和单相罩极异步电动机一样。转子侧由薄片形状的硬磁材料制成。薄片形状还可以是磁路不对称的，有直轴和交轴之分。这样，电动机运行时既有磁滞转矩又有反应转矩，如图 7-22 所示。电钟就采用这种电动机。

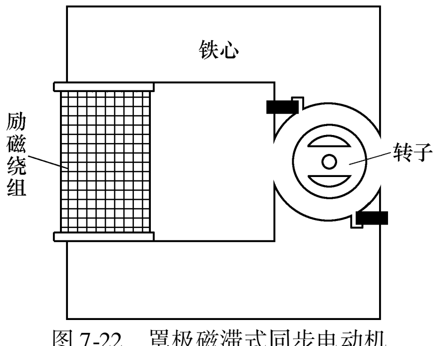


图 7-22 罩极磁滞式同步电动机

第六节 同步电机的励磁方式

供给同步电机励磁电流的电源以及附属设备统称同步电机的励磁系统。励磁系统是较大功率同步电机的重要组成部分。它的工作情况直接影响着同步电机的可靠性、经济性以及主要特性。

目前，同步电机采用的励磁系统分两大类：一类是直流发电机励磁系统；另一类是交流整流励磁系统。从励磁系统和同步电机的关系看，又可分为它励式和自励式。但无论何种励磁方式，它在工作时都应满足以下主要要求：

1）能供给正常励磁和额定励磁所需要的电流。

2）要有足够的励磁调节范围及调节稳定性。对同步发电机应能满足电压整定范围的要求；对同步电动机，应能满足功率因数的调节范围。

3）电机出现故障时，励磁系统要有较快的反应速度。例如，发电机的绕组发生短路时，励磁系统应立即灭磁；由某种原因使发电机的电压下降时，励磁系统要有快速的强励磁能力；电动机突然停转，励磁系统应能立即灭磁。

4）励磁系统要简单可靠，调节方便。

本节简单介绍几种常见的励磁方式和系统。

一、直流励磁机励磁方式

直流励磁机励磁是用直流发电机作为励磁电源，来供给同步发电机励磁电流的励磁方式。通常，直流励磁电机与同步发电机联成同轴，由同一原动机拖动。直流励磁有的用并励直流发电机，或者采用它励直流发电机。

目前，应用较多的直流励磁机励磁是用复式恒压励磁系统，如图 7-23 所示。

图中，调节同步发电机的励磁电流，主要是通过改变复式励磁发电机的励磁回路电阻 R_f，进而改变励磁机输出电压而获得，方便可靠。此外，励磁机的励磁还由电压校正器控制。校正器的交流部分通过整流变压器及电流互感器，反映同步发电机输出电流的信号，经半导体整流器整流后，接到励磁机的励磁绕组两端。当发电机负载增加时，电压降低，电流互感器的二次电流增加，反馈信号增大，使励磁电流增加，以使发电机端电压稳定不变。

这种励磁方式的特点是整个系统简单。当电网发生故障时，对系统的正常运行影响不

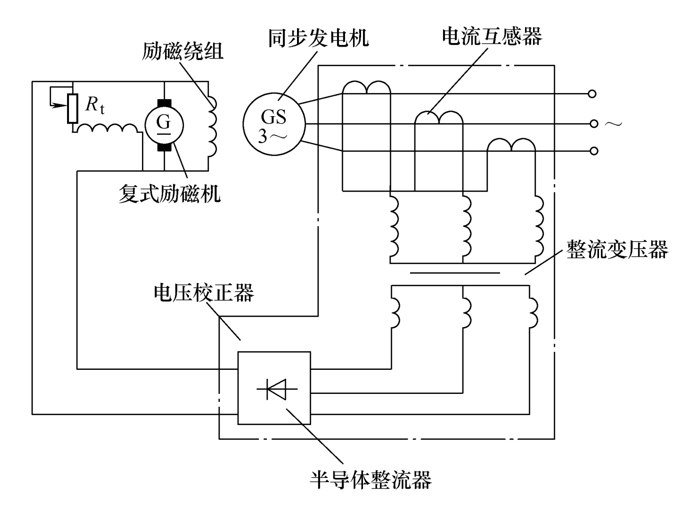


图 7-23　复式恒压励磁系统接线图

大。因此，广泛应用于中、小型同步发电机中，是使用多年的一种传统方式。但是，对较大容量的发电机，励磁机制造困难，使用受到限制。

二、自励静止半导体励磁

近年来，由于半导体元件整流的发展，使中、小型同步发电机的励磁取消了直流励磁机，被半导体励磁系统代替。对静止半导体励磁方式，又分为自励式和它励式两种。

先介绍自励式静止半导体励磁系统的原理。所谓“自励”，就是同步发电机将输出的一部分经半导体整流器整流后，供给本身需要的励磁电流。图 7-24 所示为同步发电机自励静止励磁系统中的其中一种原理接线图。

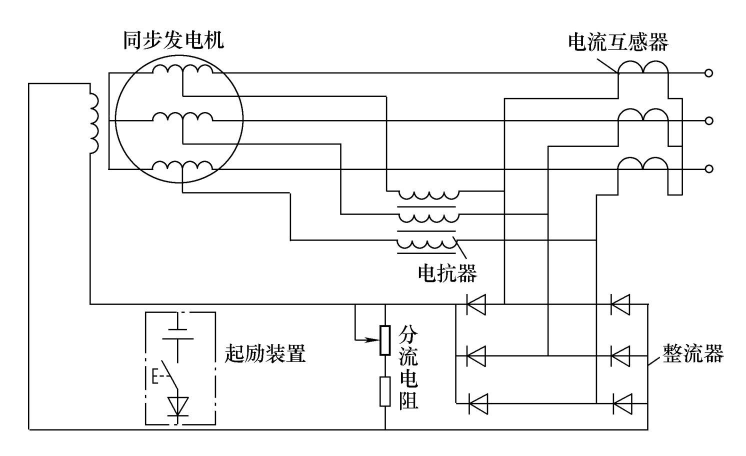


图 7-24　自励式静止励磁系统原理线路图

图中，由同步发电机的定子绕组抽头，经电抗器提供的和电流互感器提供的两个电流分量，经整流器整流，供给发电机励磁。经电抗器提供的电流分量与负载电流成正比，为补偿电枢反应所需要的相应励磁。两个电流分量的合成使发电机在任何负载时，保证其端电压基本维持不变。

分流电阻的调节可使流过励磁绕组的电流变化，起整定发电机端电压的作用。起励磁装置是发电机的起励电源。

图 7-25 为自励式静止励磁系统的另一种线路简图，为自并励式。

励磁电流主要由电压器提供。自动励磁调节器将电网信号通过晶闸管控制励磁电流，起到自动稳定发电机端电压的作用。

三、他励半导体整流器励磁

这种励磁方式是由和同步发电机同轴的交流励磁机晶闸管整流器整流提供励磁电流的。由于交流励磁机不存在换向问题，因而维护量小，而且使其制造容量比较大。

图 7-26 所示为他励晶闸管整流励磁系统简图。

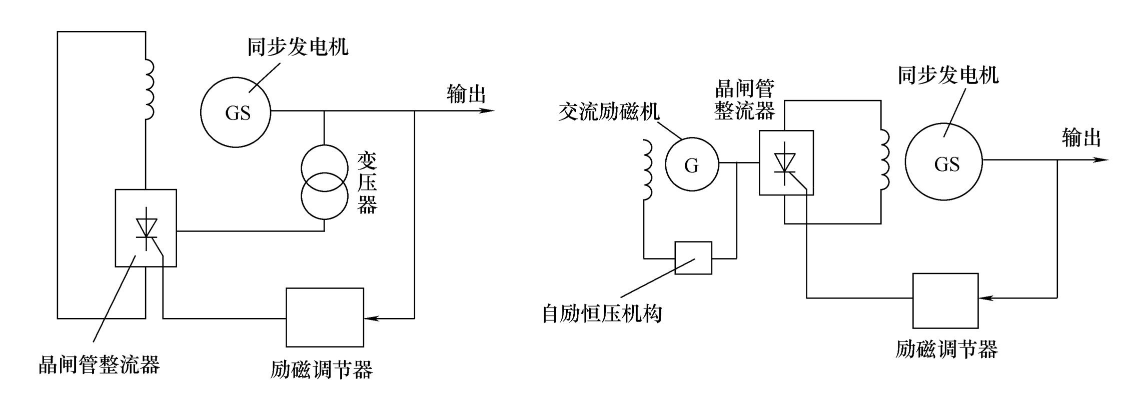


图 7-25　自并励式静止励磁系统简图

图 7-26　他励晶闸管整流励磁系统简图

图中，和同步发电机同轴的交流励磁机发出交流电压，经晶闸管整流器整流后供给同步发电机的励磁。调节晶闸管的导通角实现调节励磁电流的要求。另外，励磁调节器接在晶闸管的控制板上，将电网负载变化的信号自动反馈为励磁电流的变化，从而起到稳定同步发电机端电压的作用。图中的自励恒压机构为交流励磁机的自励恒压控制环节，以供给励磁本身的励磁需要。

近年来，在一些特殊环境下工作的同步发电机，采用了无刷硅整流励磁系统。其原理简图如图 7-27 所示。

交流励磁机是一台中频发电机（$f=100$Hz），为旋转电枢型结构。电枢电流经装在同轴上的旋转整流器整流后直接引至同步发电机转子磁极上，不需要电刷和集电环装置。交流励磁机的励磁，由自动励磁调节器直接提供。调节器的电源由同步发电机输出端供给，这样起到自动稳压作用。

图 7-27　无刷硅整流励磁系统简图

四、谐波励磁

谐波励磁是在发电机的定子槽中附加一个独立的谐波绕组，将储存于气隙磁场中的谐波功率引出来供给主电机励磁。

根据同步电机气隙磁场的分布特点，磁场的三次谐波较强。因此，一般主要利用三次谐波功率励磁。其励磁系统原理简图如图 7-28 所示。

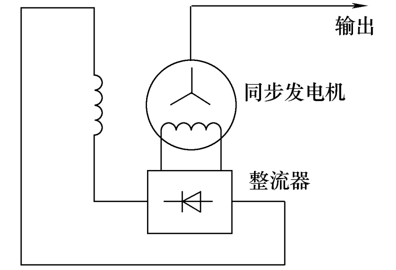


图 7-28　谐波励磁系统简图

谐波励磁方式在同步电机负载运行时有一定的自动补偿电枢反应的能力，空载时又有一定的自励能力，同时励磁系统简单可靠。但是，这种励磁功率较小，所以它适合用于小容量同步电机组中。

随着自动化控制的发展，同步电机的励磁方式和系统出现的种类及线路越来越多。此外，发电机、电动机及调相机的励磁方式和原理基本相同。读者若在实践中遇到时，可查阅研究专门这方面的资料。

第七节　中小型同步电机运行中常见的故障及排除方法

同步电机在使用和长期运行中，也经常出现一些故障，及时地排解故障，才能保证它的正常运行。本节主要分析中小型同步电机运行中常见的一些故障特点和原因，介绍对故障排除的主要方法。

同步电机的定子结构与异步电机相似，所以对异步电机定子部分的故障分析及处理，也适合于同步电机。另外，与同步电机配套的直流励磁电机是一台直流发电机。因此，对直流发电机的故障分析和处理当然也适合于励磁机，所以这里不再重述。下面分析介绍的是同步电机运行中常见的特殊故障。

一、同步电机在运行中的失磁故障

同步电机在运行中，转子磁场消失，这种现象叫失磁。是同步电机的一种故障现象。

同步电机失磁后，其空载电动势接近于零，所以它产生的电磁功率及电磁转矩几乎没有。而原动机的拖动转矩并没有改变，这会使发电机加速，以至失去同步。转子和定子旋转磁场之间出现转速差，使转子上的励磁绕组及阻尼绕组（阻尼绕组也是笼型，主要作用是减少发电机并联运行的转子振荡）产生感应电动势及电流，类似异步发电状态。其结果使转子发热，危及转子安全。

同步电动机如果失磁，则电动机的定子和转子的起动绕组组成一台异步电动机。但是，起动绕组是按短时起动用而设计的，不能长期稳定于异步运行，所以将使电动机过热烧坏。

同步电机失磁后，必须立即停机，检查原因。同步电机失磁故障的原因主要有以下几方面：

1）励磁绕组断线。最常见的断线位置是凸极机的励磁绕组两个线圈的连接处。

2）磁场变阻器接触不良。

3）直流励磁机的励磁绕组断线。

4）励磁机的换向器发生环火现象等。

同步电机失磁后的主要表现是励磁电流及励磁电压为零，而同步电机的定子电流增加并且摆动。根据这些表现找原因，其故障不难排解。

二、同步电机的逆磁故障

同步电机在运转过程中，励磁电流突然反向，电机内的磁极方向随之改变，这种现象称

为逆磁现象。这种现象发生后，励磁回路的电压表和电流表均发生反向偏转，其他仪表仍正常。

因为逆磁过程相当于电机首先失磁，然后反向励磁两个过程的组合，电机则会有一个先失步，然后又进入同步的过程。过程时间虽然很短，但产生的冲击电流很大。经常出现逆磁，对电机是很不利的。

产生逆磁的主要原因有以下几点：

1）调磁时，调节励磁机的磁场电阻，如果增加速度过快，这会使励磁机的端电压迅速下降，因而供给同步电机的励磁电流迅速减小。由于同步电机的励磁绕组电感较大，会因此产生和励磁电流同方向的感应电动势，而且此电动势很高，其结果使并励直流励磁机的励磁电压及电流反向，导致励磁机的输出端极性改变，同步电机出现逆磁。

2）励磁机的励磁回路先断开又重新接通，也可能引起励磁机的磁场极性发生变化，从而使同步电机逆磁，原理与上面原因 1）相同。

3）励磁机的换向器和电刷接触不良，发生瞬间断电，从而在同步电机的励磁线圈中感应瞬间电动势，引起励磁机的励磁电流反向。

4）同步发电机发生短路时，产生很强的电枢反应。由于去磁磁动势的作用，在发电机励磁线圈中感应出助磁作用的电动势，其电流流入励磁机，使其磁场去磁。当这个电流足够大的时候，励磁机的磁场也会改变极性，从而使同步电机逆磁。

同步电机在运行中遇到逆磁情况，可不必停机，只将励磁电压表和励磁电流表的极性对调一下。待同步电机停机时，查找原因修复，对励磁机重新充磁，恢复原有的极性即可。

三、硅整流器件的损坏

在自励式同步电机中，硅整流器件工作的可靠性直接影响同步电机的运行好坏。而硅整流器件受到不良的影响比较容易损坏，损坏的原因有以下几方面：

1）规格选用不当，实际正向电流或反向电压超过了器件的允许值。

2）运行、操作和维修过程中，操作不当，产生过电压，将器件击穿。例如，在用绝缘电阻表测量转子绝缘电阻时，没有将硅器件断开，也没有用导线将硅器件短接，致使硅器件击穿；与主回路有电气联系的硅器件遭受雷电袭击而击穿。

3）负载功率因数过低，励磁回路长期过载，常使同步电动机的硅器件过热而损坏。

4）硅器件散热面积不够或环境温度过高，使其散热困难，造成过热而烧坏。

通常，用万用表可大概判断器件是否损坏。对整流用硅管，当其正向电阻和反向电阻数值差别很大，例如，其正向电阻为几百到几千欧；而反向电阻大于几百千欧，说明硅器件有良好的单相导电性。如果正、反向电阻相差不多，则说明此硅器件以损坏。

对损坏的硅器件，一定要及时更换。

四、同步发电机转子接地故障

同步发电机的转子励磁绕组与磁极铁心之间的绝缘损坏，使线圈直接与铁心相碰或者局部绝缘电阻降低到相当低的程度。这种故障称为同步发电机的转子接地故障。

当转子线圈只有一点接地时，线圈与地之间尚未形成回路，故障点没有电流通过，励磁电流仍保持正常状态。如果转子线圈有两处以上的接地故障点，则励磁电流会失去常态，磁路也要失去平衡，导致发电机的机械振动。两个接地点的位置不同，对发电机的危害程度也不一样。如果转子绕组的进出线两端头同时接地，则相当整个励磁系统被短路，发电机会失

磁。同时，被短路的励磁绕组内有过大的感应电流，转子会很快过热或烧坏。若两个接地点发生在一个励磁线圈内，就相当于部分励磁绕组短路，该磁极的磁通将因此减少。对并入电网运行的同步发电机，如果发现励磁电流突然增加，励磁电压下降，功率因数上升及发电机产生不寻常的机械振动，则可判断定是转子发生了两点接地故障或者是励磁线圈有匝间短路故障，应立即修复。

五、同步电机的振荡故障

当同步电机的转矩从一个稳定值过渡到另一个稳定值时（例如增加负载转矩），则功率角 δ 由 δ_1 要过度到 δ_2。但是，由于 δ 在变化过程中中会带来转子的转速变化，所以 δ_1 不是直接变为 δ_2 的，而是经过在 δ_2 附近来回振荡若干次才逐渐稳定在 δ_2 的，这种现象叫做振荡。如果振荡的振幅 $\Delta\delta$ 逐渐衰减，最终 δ 值会稳定下来，电机又以同步转速运行，这是正常现象，如图 7-29a 所示。如果振幅 $\Delta\delta$ 逐渐扩大，δ 则不能稳定，直至电机出现失步。这则是振荡故障，如图 7-29b 所示。

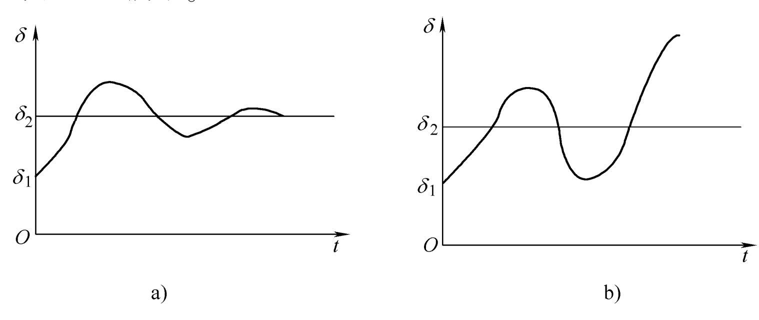


图 7-29　同步电机功率角的振荡

a）稳定振荡　b）不稳定振荡

同步电机的振荡故障大多是由电机以外的因素引起的。例如，电网的冲击，同步发电机的原动机出现强迫拖动；同步电动机的机械负载出现强迫阻力等。

1. 柴油发电机的扭振及功率振荡

柴油发电机的原动机——柴油机，是一种活塞式动力机械。在曲轴上形成的转矩除了固定分量外，还有交变分量。由于交变分量的存在，使发电机很容易产生振荡。这种振荡的结果，使发电机的输出电压发生波动。减小这种振荡的办法，一般是增设足够大的飞轮，减少转速的摆动。

如果两台柴油发电机组并联运行，由于两台机组运行的情况不可能同步，从而使机组间要产生环流振荡，即为功率振荡。这种情况一发生，破坏了机组的正常供电。不过，这种振荡是随机性的，时而出现。时而消失，其频率很低。为避免机组间的负载分配不均匀，以及转速、功率发生振荡，并联机组要满足以下条件。

1）每台柴油机的调速特性要选择的相同，使负载分配与各发电机的功率成正比。

2）柴油机调速器的稳定性高，不发生振荡。

3）发电机装有阻尼绕组，以增强阻尼转矩，缓冲原动机的交变转矩。

4）机组要有足够的飞轮转矩，以减缓转速的变化。

2. 同步电动机的振荡

如果被同步电动机驱动的机械是活塞式机械，其负载转矩也含有交变分量，则形成对机

组的强迫振荡。当负载转矩中的交变分量足够大时，同步电动机将无法同步运行。这时唯一的办法是增加机组的飞轮转矩，缓冲功率角 δ 的变化幅度。

六、同步电动机的起动故障

同步电动机当采用异步起动时，在异步电动机中可能出现的起动故障，都有可能发生在同步电动机中。另外，在一些特殊情况下，虽然磁极上已通入励磁电流，但转子始终不能牵入同步转速。大致有以下原因：

1）负载转矩太大。

2）起动时电压太低。

3）起动用笼型绕组电阻太大。

4）磁极极性错误。

5）转子励磁线圈有匝间短路等。

同步电动机在运行中还可能出现其他故障。但是，无论哪种故障出现，均会使电动机有不正常的现象伴随产生。因此，一方面要对同步电动机的运行要注意维护，另一方面，对各种不正常现象的出现要多分析、比较、找特点，才能查出故障所在，得出故障原因，加以修复。

第八节　异步电动机的运行同步化

绕线转子异步电动机起动后，改为同步电动机运行。这种运行方式称为异步电动机的运行同步化。

异步电动机的运行同步化措施，对机械负载没有影响，而对电网的增产节支、提高经济效益有很重要的意义。这是因为，电网上的负载大多数是电感性的动力负荷。使其功率因数是滞后性的，而且较低。异步电动机的运行同步化，不仅减少了感性负荷，而且还能向电网输送一部分感性无功功率，这对电网功率因数的提高、减少供电线路的损耗、提高供电质量是一个积极的措施。

例：一台额定功率为630kW 的绕线式异步电动机，额定电压为6000V，空载电流（即励磁电流）$I_0=50\text{A}$。当在异步空载运行时，电动机向电网吸取的感性无功功率为

$$Q=\sqrt{3}U_\text{N}I_0=\sqrt{3}\times6000\times50=519\text{kvar}$$

如果把它改为同步化运行，取同步运行时的定子电势，$E_0=U_\text{N}$，则空载运行时的定子电流很小。这时，电动机基本上不再向电网吸取无功功率了。这就是说，对电网相当节省了近500kvar 的无功功率。如果按此台的发热情况，可取 $E_0\approx1.3U_\text{N}$。这样，电动机空载运行时还可向电网供应一部分感性无功功率。

一、异步电动机运行同步化的原理和方法

绕线转子异步电动机的转子是三相对称绕组，一般为星形接法。三相出线端通过集电环及电刷引出来。作异步电动机起动时，可将静止的三相起动电阻传接于转子绕组中。当它起动后，可将其转子三相绕组改为励磁绕组，接入直流励磁，即可将其拉入同步转速运行，变为同步电动机运行状态。

三相转子绕组改接为励磁绕组，是采用改变接线来实现的。目前，有以下几种不同接法：

1）两并一串的励磁接法，如图 7-30a 所示。

2）两串的励磁接法，如图 7-30b 所示。

3）三串的励磁接法，如图 7-30c 所示。

4）两串一短接的励磁接法，如图 7-30d 所示。

5）改为两相的励磁接法，如图 7-30e 所示。

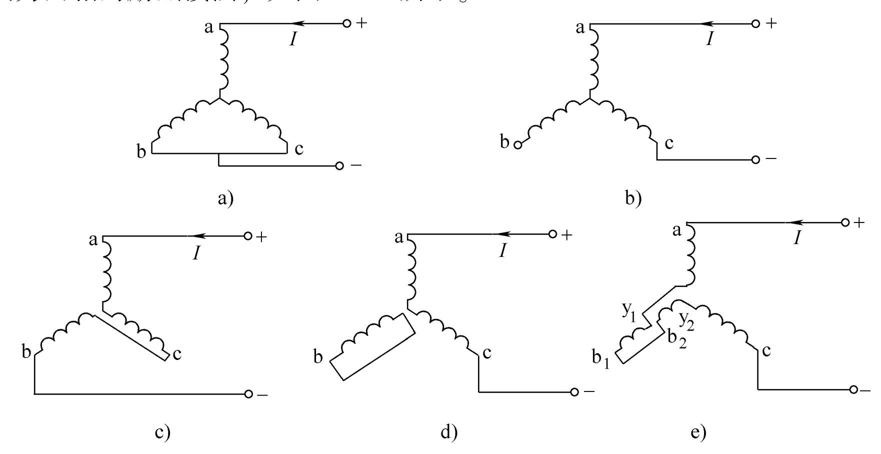


图 7-30　异步电动机运行同步化的励磁绕组的接法

实践证明，以上 5 种励磁接线方法中，两并一串的接线比较方便。但是，转子励磁磁动势较小，只有 A 相绕组磁动势的 1.5 倍。两串的励磁接线也很简单，而且转子励磁磁动势较高，它为 A 相绕组磁动势的$\sqrt{3}$倍。但是电动机的动态性能较差，比如容易产生过电压，过载能力不高等。三串的励磁接线比较复杂，而且需要在转子端增加两个集电环。转子励磁磁动势比较高，为一相磁动势的 2 倍。同时，它的静态过载能力较强。但是，这种励磁方式使电动机的动态性能较差。两串一短接的励磁接法，其转子励磁磁动势和两串相当，由于多了一个短路绕组，其动态性能得到了改善，动态过载能力也较高。两相的励磁接法，虽然转子励磁磁动势略大于三串的励磁接法，但是，转子的一相绕组需要分成两部分，接线很麻烦。

异步电动机的运行同步化，不仅要改变转子绕组的接线，还需要一套可调的直流电源，以供运行的转子励磁。

二、异步电动机运行同步化的接线原理图

图 7-31 所示为异步电动机的起动和同步化运行的接线原理图。

图中，M 是绕线转子异步电动机，其转子绕组采用的是两并一串的励磁接法。R 是起动用的频敏变阻器。KM1 和 KM2 是两个交流接触器，KM3 是一个直流接触器。Tr 是整流用变压器，容量约为异步电动机的 5%。FU2 是快速熔断器。

电动机起动时，先将交流接触器 KM1 和 KM2 闭合，这时，电动机转子串频敏变阻器起动。待起动完毕，KM2 断开，KM3 闭合，将频敏变阻器切除，送直流电流给转子励磁，电动机被拉入同步运行。直流励磁电流由硅整流器（VD1 ~ VD6）获得。

异步电动机的运行同步化还存在一个问题，就是它的运行过载能力比原来有所下降。在使用中应特别注意，并且有待进一步改进。

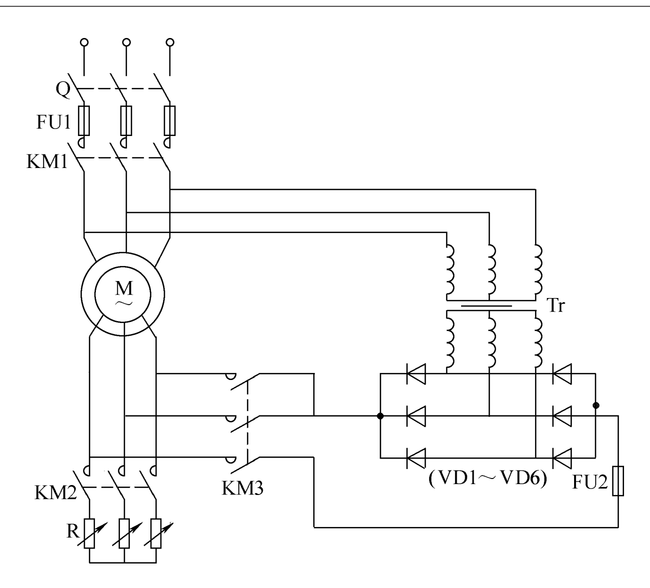


图 7-31　异步电动机运行同步化的主电路接线原理图

附　　录

附录 A　电机产品代号

A-1　异步电动机产品代号

表 A-1　异步电动机产品代号

序号	产 品 名 称	新产品代号	代号汉字意义	老产品代号
1	异步电动机	Y	异	J、JS、JK、JO
2	绕线转子异步电动机	YR	异绕	JR、JRO、YR
3	大型高速（快速）异步电动机	YK	异（快）	JK
4	大型绕线转子高速（快速）异步电动机	YRK	异绕（快）	YRG
5	高起动转矩异步电动机	YQ	异起	JQ、JGQ
6	高转差率（滑差）异步电动机	YH	异（滑）	JH、JHO
7	多速异步电动机	YD	异多	JD、JDO
8	立式异步电动机（大中型）	YL	异立	YLL
9	绕线转子立式异步电动机（大中型）	YRL	异绕立	
10	精密机床用异步电动机	YJ	异精	JJO
11	制动异步电动机（傍磁式）	YEP	异（制）傍	JZD
12	制动异步电动机（杠杆式）	YEG	异（制）杠	
13	制动异步电动机（附加制动器式）	YEJ	异（制）加	
14	锥形转子制动异步电动机	YEZ	异（制）锥	JZZ
15	电磁调速异步电动机	YCT	异磁调	JZT
16	机械调速异步电动机	YJT	异机调	JT
17	换向器式（整流子）调速异步电动机	YHT	异换调	JZS
18	齿轮减速异步电动机	YCJ	异齿减	JTC
19	摆线针轮减速异步电动机	YXJ	异线减	JXJ
20	行星齿轮减速异步电动机	YHJ	异行减	
21	力矩异步电动机	YLJ	异力矩	
22	装入式异步电动机	YUR	异（装）入	
23	滚筒用异步电动机	YGT	异滚筒	
24	频繁起动用异步电动机	YPQ	异频起	
25	辊道用异步电动机	YG	异辊	JG、JGK、JGK、JGW
26	起重用冶金用异步电动机	YZ	异重	JZ

（续）

序号	产 品 名 称	新产品代号	代号汉字意义	老产品代号
27	起重冶金用绕线式异步电动机	YZR	异重绕	JZR
28	起重冶金用绕线转子（管道通风式）异步电动机	YZRG	异重绕管	JZRG
29	起重冶金用绕线转子（自带风机式）异步电动机	YZRF	异重绕风	
30	起重冶金用制动异步电动机	YZE	异重（制）	
31	起重冶金用减速异步电动机	YZJ	异重减	
32	起重冶金用减速绕线式异步电动机	YZRJ	异重绕减	
33	电梯用异步电动机	YTD	异梯电	JTD
34	木工用异步电动机	YM	异木	JM
35	中频异步电动机	YZP	异中频	
36	电动阀门用异步电动机	YDF	异电阀	
37	耐振用异步电动机	YN	异耐	
38	震捣器用异步电动机	YUD	异（震）捣	
39	管道泵用异步电动机	YGB	异管泵	
40	立式深井泵用异步电动机	YLB	异立泵	JLB
41	井用（充水式）潜水异步电动机	YQS	异潜水	JQS
42	井用潜油异步电动机	YQY	异潜油	JTY
43	井用充油式潜水异步电动机	YQSY	异潜水油	
44	井用潜齿异步电动机	YQL	异潜齿	JQL
45	钻探用异步电动机	YTZ	异探	JTZ
46	单相电容起动异步电动机	YDY	异单（容）	JDY
47	屏蔽式异步电动机	YP	异屏	
48	装岩机用异步电动机	YI	异（岩）	
49	轴流式局部扇风机（通风机）	YT	异（通）	
50	防爆安全型异步电动机	YA	异安	JAD
51	隔爆型异步电动机	YB	异爆	JB、JBS
52	防爆通风型异步电动机	YF	异风	
53	防爆安全型绕线转子异步电动机	YAR	异安绕	JAR
54	隔爆型绕线转子异步电动机	YBR	异爆绕	JBR
55	防爆安全型高起动转矩异步电动机	YAQ	异安起	
56	防爆安全型高转差率（滑率）异步电动机	YAH	异安（滑）	
57	隔爆型高转差率（滑率）异步电动机	YBH	异爆（滑）	
58	隔爆型高起动转矩异步电动机	YBQ	异爆起	

（续）

序号	产 品 名 称	新产品代号	代号汉字意义	老产品代号
59	防爆安全型多速异步电动机	YAD	异安多	
60	隔爆型多速异步电动机	YBD	异爆多	
61	隔爆型制动异步电动机（傍磁式）	YBEP	异爆（制）傍	
62	隔爆型制动异步电动机（杠杆式）	YBEG	异爆（制）杠	
63	隔爆型制动异步电动机（附加制动器）	YBEJ	异爆（制）加	
64	防爆安全型电磁调速异步电动机	YACJ	异安磁调	
65	隔爆型电磁调速异步电动机	YBCT	异爆磁调	
66	防爆安全型机械调速异步电动机	YAJT	异安机调	
67	隔爆型机械调速异步电动机	YBJT	异爆机调	
68	防爆安全型齿轮减速异步电动机	YACJ	异安齿减	
69	隔爆型齿轮减速异步电动机	YBCJ	异爆齿减	
70	电梯用防爆安全型异步电动机	YATD	异安梯电	
71	电梯用隔爆型异步电动机	YBTD	异爆梯电	
72	电动阀门用防爆安全型异步电动机	YADF	异安电阀	
73	电动阀门用隔爆型异步电动机	YBDF	异爆电阀	
74	震捣器用防爆安全型异步电动机	YAUD	异安（震）捣	
75	管道泵用隔爆型异步电动机	YBGB	异爆（管）泵	
76	隔爆型屏蔽式异步电动机	YBP	异爆屏	
77	装岩机用隔爆型异步电动机	YBI	异爆（岩）	JBI
78	隔爆型轴流式局部扇风机（通风机）	YBT	异爆（通）	JBT
79	链板运输机用隔爆型异步电动机	YBY	异爆运	JBY
80	绞车用隔爆型异步电动机	YBJ	异爆绞	JBJ
81	回柱绞车用隔爆型异步电动机	YBH	异爆回	
82	立式深井泵用隔爆型异步电动机	YBLB	异爆立泵	
83	起重冶金用隔爆型异步电动机	YBZ	异爆重	

A-2 同步电机产品代号

表 A-2 同步发电机产品代号

序号	产 品 名 称	新产品代号	代号汉字意义	老产品代号
1	同步发电机	TF	同发	T、TF
2	低频同步发电机	TFDP	同发低频	TDP
3	中频同步发电机	TFZP	同发中频	TZP
4	双频同步发电机	TFSP	同发双频	
5	正弦波同步发电机	TFX	同发弦	TX

（续）

序号	产 品 名 称	新产品代号	代号汉字意义	老产品代号
6	永磁式同步发电机	TFY	同发永	
7	感应式同步发电机	TFG	同发感	
8	单相同步发电机	TFD	同发单	
9	试验用同步发电机	TFS	同发试	
附：同步调相机				
1	同步调相机	TT	同调	TT

表 A-3　同步电动机产品代号

序号	产 品 名 称	新产品代号	代号中文意义	老产品代号
1	同步电动机	T	同	TD、TDO
2	防爆安全型同步电动机	TA	同安	
3	隔爆型同步电动机	TB	同爆	
4	空气压缩机用隔爆型同步电动机	TBK	同爆空	
5	防爆通风型同步电动机	TDF*	同动风	
6	高速同步电动机	TG	同高	TDG
7	空气压缩机用同步电动机	TK	同空	TDK
8	立式同步电动机	TL	同立	TDL
9	磨机用同步电动机	TM	同磨	TDMK
10	磁阻式同步电动机	TC	同磁	
11	永磁式同步电动机	TY	同永	
12	轧机用同步电动机	TZ	同轧	TDZ
13	低频同步电动机	TDP	同低频	
14	中频同步电动机	TZP	同中频	TP
附：同步异步电动机				
1	同步异步电动机	TYD	同异动	

注：* 为避免与同步发电机类型代号 TF 重复，故采用 TDF

A-3　驱动微电机产品代号

表 A-4　驱动微电机产品基本系列代号

产 品 类 型	基本系列产品名称	代　　号
异步电动机	微型三相异步电动机	A
	微型单相电阻起动异步电动机	B
	微型单相电容起动异步电动机	C
	微型单相电容运转异步电动机	D
	微型单相电容起动和运转异步电动机	E
	微型单相罩极电动机	F

（续）

产品类型	基本系列产品名称	代号
换向器电动机	微型单相串激电动机	G
	微型交直流两用电动机	H
	微型直流并激电动机	K
	微型直流复激电动机	L
	微型永磁直流电动机	M
同步电动机	微型三相磁滞式同步电动机	R
	微型单相磁滞式同步电动机	S
中频电动机	三相中频异步电动机	W
	单相中频异步电动机	X

表 A-5 驱动微电机产品派生系列代号

派生及专用系列产品名称		代表派生及专用意义的汉字	派生及专用系列代号
1	多速微型电动机	多	□D
2	高起动转矩微型电动机	起	□Q
3	高滑率微型异步电动机	滑	□H
4	断续定额微型电动机	续	□X
5	短时定额微型电动机	时	□S
6	反应式同步电动机结构派生	同	□T
7	齿轮减速微型电动机	齿	□C
8	机床冷却用电泵	泵	□B
9	缝纫机用微型电动机	缝	□F
10	锥形转子微型电动机	锥	□Z
11	装入式微型电动机	入	□R
12	微型三相力矩电动机	矩	□J
13	稳速微型电动机	稳	□W
14	宽调速微型电动机	宽	□K
15	精密级微型电动机	密	□M
16	摇篮式防振电动机	摇	□Y
17	防爆电动机	爆	□P

附录 B 三相异步电动机技术数据

B-1 Y 系列（IP44）小型三相异步电动机技术数据（380V，50Hz）

表 B-1 Y 系列（IP44）小型三相异步电动机技术数据（380V，50Hz）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根-mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m²)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 cosφ																
Y801—2	0.75	1.8	2830	75	0.84	7	2.2	2.2	65	0.3	120	67	1—ϕ0.63	111	0.65	单层交叉1丫	1—9 2—10 18—11	18/16	0.00075	16	1.3
Y802—2	1.1	2.5		77	0.86				80				1—ϕ0.71	90	0.82				0.0009	17	1.45
Y801—4	0.55	1.5	1390	73	0.76	6.5			65	0.25		75	1—ϕ0.56	128	0.76	单层链式1丫	1—6	24/22	0.0018	17	1.15
Y802—4	0.75	2.0		74.5	0.76				80				1—ϕ0.63	103	0.97				0.0021	18	1.3
Y90S—2	1.5	3.4	2840	78	0.85	7			85	0.35	130	72	1—ϕ0.8	74	1.24	单层交叉1丫	1—9 2—10 18—11	18/16	0.0012	22	1.5
Y90L—2	2.2	4.7		82	0.86				110				1—ϕ0.95	58	1.60				0.0014	25	1.9
Y90S—4	1.1	2.8	1400	78	0.78	6.5			90	0.25		80	1—ϕ0.71	81	1.30	单层链式1丫	1—6	24/22	0.0021	22	1.4
Y90L—4	1.5	3.7		79	0.79				120				1—ϕ0.8	63	1.60				0.0027	27	1.6
Y90S—6	0.75	2.3	910	72.5	0.70	6	2.0	2.0	100			86	1—ϕ0.67	77	1.30			36/33	0.0029	23	1.7
Y90L—6	1.1	3.2		73.5	0.72				125				1—ϕ0.75	60	1.60				0.0035	25	1.9
Y100L—2	3.0	6.4	2870	82	0.87	7	2.2	2.2	100	0.4	155	94	1—ϕ1.18	40	2.2	单层同心1丫	1—12 2—11	24/20	0.0029	33	2.8
Y100L1—4	2.2	5.0	1430	81	0.82				105	0.3		98	2—ϕ0.71	41	2.1	单层交叉1丫	1—9 2—10 18—11	36/32	0.0054	34	2.5
Y100L2—4	3.0	6.8		82.5	0.81				135				1—ϕ1.18	31	3.0				0.0067	38	2.9
Y100L—6	1.5	4.0	940	77.5	0.74	6	2.0	2.0	100	0.25		106	1—ϕ0.85	53	2.1	单层链式1丫	1—6	36/33	0.0069	33	2

（续）

型号	额定功率/kW	满　载　时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根－mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m^2)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 cosφ																
Y112M—2	4.0	8.2	2890	85.5	0.87	7	2.2	2.2	105	0.45	175	98	1—φ1.06	48	2.7	单层同心1△	1—16 2—15 3—14 1—14 2—13	30/26	0.0055	45	3.7
Y112M—4	4.0	8.8	1440	84.5	0.82				135	0.3		110	1—φ1.06	46	3.8	单层交叉1△	1—9 2—10 18—11	36/32	0.0095	43	3.7
Y112M—6	2.2	5.6	940	80.5	0.74	6	2.0	2.0	110			120	1—φ1.06	44	2.9	单层链式1Y	1—6	36/33	0.0138	45	2.8
Y132S1—2	5.5	11	2900	85.5	0.88	7	2.0	2.2	105	0.55	210	116	1—φ0.9 1—φ0.95	44		单层同心1△	1—16 2—15 3—14 1—14 2—13	30/26	0.0109	64	5.7
Y132S2—2	7.5	15		86.2	0.88				125				1—φ1.0 1—φ1.06	37					0.0126	70	6.8
Y132S—4	5.5	12	1440	85.5	0.84		2.2		115	0.4		136	1—φ0.9 1—φ0.95	47		单层交叉1△	1—9 2—10 18—11	36/32	0.0214	68	5.7
Y132M—4	7.5	15		87	0.85				160				2—φ1.06	35					0.0296	81	6.5
Y132S—6	3.0	7.2	960	83	0.76	6.5	2.0	2.0	110	0.35		148	1—φ0.85 1—φ0.9	38		单层链式1△	1—6	36/33	0.0286	63	3.5
Y132M1—6	4.0	9.4		84	0.77				140				1—φ1.06	52					0.0357	73	4

（续）

型号	额定功率/kW	满载时 定子电流/A	满载时 转速/(r/min)	满载时 效率(%)	满载时 功率因数 cosφ	堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根-mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m²)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
Y132M2—6	5.5	13	960	85.3	0.78	6.5	2.0	2.0	180	0.35	210	148	1—ϕ1.25	42		单层链式1△	1—6	36/33	0.0449	84	5.2
Y132S—8	2.2	5.8	710	81	0.71	5.5			110				1—ϕ1.12	38		单层链式1Y		48/44	0.0314	63	4
Y132M—8	3.0	7.7		82	0.72				140				1—ϕ1.30	30					0.0395	79	4.4
Y160M1—2	11	22	2930	87.2	0.88	7		2.2	125	0.65	260	150	2—ϕ1.18 1—ϕ1.25	28		单层同心	1—16 2—15 3—14 1—14 2—13	30/26	0.0377	117	11.2
Y160M2—2	15	29		88.2	0.88				155				2—ϕ1.12 2—ϕ1.18	23					0.0449	125	12
Y160L—2	18.5	36		89	0.89				195				3—ϕ1.12 2—ϕ1.18	19					0.0550	147	13.3
Y160M—4	11	23	1460	88	0.84		2.2		155	0.5		170	1—ϕ1.30	56		单层交叉2△	1—9 2—10 18—11	36/26	0.0747	123	8.4
Y160L—4	15	30		88.5	0.85				195				2—ϕ1.25 1—ϕ1.18	22		单层交叉1△			0.0918	144	9.9
Y160M—6	7.5	17	970	86	0.78	6.5	2.0	2.0	145	0.4		180	2—ϕ1.12	38		单层链式1△	1—6	36/33	0.0881	119	7.1
Y160L—6	11	25		87	0.78				195				4—ϕ0.95	28					0.116	147	8.9
Y160M1—8	4.0	9.9	720	84	0.73	6			110				1—ϕ1.25	49	5.3			48/44	0.0753	118	6.3
Y160M2—8	5.5	13		85	0.74				145				2—ϕ1.0	39	6.9				0.0931	119	7.2

（续）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根-mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m^2)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 $\cos\varphi$																
Y160L—8	7.5	18	720	86	0.75	5.5	2.0	2.0	195	0.4	260	180	1—ϕ1.12 1—ϕ1.18	30	8.5	单层链式1△	1—6	48/44	0.126	145	8.7
Y180M—2	22	42	2940	89	0.89	7		2.2	175	0.8	290	160	2—ϕ1.3 2—ϕ1.4	16	12.3	双层叠式2△	1—14	36/28	0.075	180	14.7
Y180M—4	18.5	36	1470	91	0.86				190	0.55		187	2—ϕ1.18	32	13.5		1—11	48/44	0.139	182	12.5
Y180L—4	22	43		91.5	0.86				220				2—ϕ1.3	28	15.2				0.158	190	14.2
Y180L—6	15	31	970	89.5	0.81	6.5	1.8	2.0	200	0.45		205	1—ϕ1.5	34	13.3		1—9	54/44	0.207	195	11.1
Y180L—8	11	25	730	86.5	0.77	6	1.7		200				2—ϕ0.9	46	12.2		1—7	54/58	0.203	184	9.9
Y200L1—2	30	57	2950	90	0.89	7	2.0	2.2	180	1.0	327	182	2—ϕ1.12 2—ϕ1.18	28	12.2		1—14	36/28	0.124	240	20.2
Y200L2—2	37	70		90.5	0.89				210				1—ϕ1.4 2—ϕ1.5	24	18.7	双层叠式4△			0.139	255	24.4
Y200L—4	30	57	1470	92.2	0.87				230	0.65		210	1—ϕ1.06 1—ϕ1.12	48	19.4	双层叠式2△	1—11	48/44	0.262	270	18.4
Y200L1—6	18.5	38	970	89.8	0.83	6.5	1.8	2.0	195	0.5		230	1—ϕ1.12 1—ϕ1.18	32	16		1—9	54/44	0.315	220	12.3
Y200L2—6	22	45		90.2	0.83				220				2—ϕ1.25	28	148				0.360	250	138
Y200L—8	15	34	730	88	0.76	6			195				1—ϕ1.06 1—ϕ1.12	38	16		1—7	54/58	0.339	250	11.9
Y225M—2	45	84	2970	91.5	0.89	7	2.0	2.2	210	1.1	368	210	3—ϕ1.4 1—ϕ1.5	22	24.3		1—14	36/28	0.233	309	28.8

（续）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根－mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m^2)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 cosφ																
Y225S—4	37	70	1480	91.8	0.87	7	1.9	2.2	210	0.7	368	245	2—ϕ1.25	46	21.3	双层叠式4△	1—12	48/44	0.406	284	24.1
Y225M—4	45	84	1480	92.3	0.88				235				1—ϕ1.30 1—ϕ1.40	40	23.6				0.469	320	26.3
Y225M—6	30	60	980	90.2	0.85	6.5	1.7	2.0	210	0.5		260	2—ϕ1.40 1—ϕ1.30	26	16.6	双层叠式2△	1—9	54/44	0.547	292	23.8
Y225S—8	18.5	41	730	89.5	0.76	6			170					38	16		1—7	54/58	0.491	266	20.3
Y225M—8	22	48	740	90	0.78		1.8		210				2—ϕ1.40 2—ϕ1.50	32	18.2				0.547	292	21.9
Y250M—2	55	103	2970	91.5	0.8	7	2.0	2.2	195	1.2	400	225	6—ϕ1.40	20	20.2		1—14	36/28	0.312	403	37.6
Y250M—4	55	103	1480	92.6	0.88				240	0.8		260	3—ϕ1.30	36	29.9	双层叠式4△	1—12	48/44	0.66	427	34.6
Y250M—6	37	72	980	90.8	0.86	6.5	1.8	2.0	225	0.55		285	1—ϕ1.12 2—ϕ1.18	28	17.8	双层叠式3△		72/58	0.834	408	27.2
Y250M—8	30	63	740	90.5	0.80	6			225				3—ϕ1.30	22	25.7	双层叠式2△	1—9		0.834	405	23.9
Y280S—2	75	140	2970	91.5	0.89	7	2.0	2.2	225	1.5	445	255	7—ϕ1.50	14	38.5	双层叠式2△	1—16	42/34	0.597	544	45.6
Y280M—2	90	167		92	0.89				260				8—ϕ1.50	12	46.4				0.675	620	47
Y280S—4	75	140	1480	92.7	0.88		1.9		240	0.9		300	2—ϕ1.25 2—ϕ1.30	26	38.8	双层叠式4△	1—14	60/50	1.12	562	42.1
Y280M—4	90	164		93.6	0.89				325				5—ϕ1.30	20	47.1				1.48	667	48.4

（续）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根-mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m^2)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 cosφ																
Y280S—6	45	85	980	92	0.87	6.5	1.8	2.0	215	0.65	445	325	2—φ1.30 1—φ1.40	26	22.8	双层叠式3△	1—12	72/58	1.39	536	34.4
Y280M—6	55	104		92	0.87				260				1—φ1.40 2—φ1.50	22	26.2				1.65	595	38.6
Y280S—8	37	78	740	91	0.79	6			215				2—φ1.30	40	32.1	双层叠式4△			1.39	520	29.5
Y280M—8	45	93		91.7	0.80				260				1—φ1.50 1—φ1.40	34	35.8				1.65	592	24.7
Y315S—2	110	200	2980	93	0.90	7		2.2	290	1.8	520	300	10—φ1.50 4—φ1.60	9	—	双层叠绕2△	1—18	48/40	1.18	980	—
Y315M1—2	132	237		94	0.90				340				5—φ1.40 12—φ1.50	8	—				1.82	1080	—
Y315M2—2	160	286		94.5	0.90				380				17—φ1.60	7	—				2.08	1160	—
Y315S—4	110	201	1480	93.5	0.89				300	1.1		350	3—φ1.30 4—φ1.40	16	—	双层叠绕4△	1—17	72/64	3.11	1000	—
Y315M1—4	132	241	1490	93.5	0.89				350				3—φ1.30 4—φ1.50	14	—				3.62	1100	—
Y315M2—4	160	291		94	0.89				400				2—φ1.40 6—φ1.50	12	—				4.13	1160	—

（续）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度/mm	气隙长度/mm	定子外径/mm	定子内径/mm	定子线规/(根－mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	转动惯量/(kg·m^2)	电动机质量/kg	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 $\cos\varphi$																
Y315S—6	75	141	990	93	0.87	6.5	1.6	2.0	300	0.8	520	375	1—ϕ1.40 2—ϕ1.50	34	—	双层叠式6△	1—11	72/58	4.11	990	—
Y315M1—6	90	168		93.5	0.87				350				1—ϕ1.50 2—ϕ1.60	30	—				4.78	1080	—
Y315M2—6	110	204		94	0.87				400				1—ϕ1.40 3—ϕ1.50	25	—				5.45	1150	—
Y315M3—6	132	245		94	0.87				455				1—ϕ1.50 3—ϕ1.60	22	—				6.12	1210	—
Y315S—8	55	111	740	92	0.82				300			390	7—ϕ1.50	14	—	双层叠绕2△	1—9		4.79	1000	—
Y315M1—8	75	150		92.5	0.82				350				1—ϕ1.50 1—ϕ1.60	46	—	双层叠绕8△			5.58	1100	—
Y315M2—8	90	179		93	0.82				400				4—ϕ1.30 2—ϕ1.40	20	—	双层叠绕4△			6.37	1160	—
Y315M3—8	110	219		93	0.82				455				1—ϕ1.40 2—ϕ1.50	34	—	双层叠绕8△			7.23	1230	—
Y315S—10	45	99	590	91	0.76		1.4		300				1—ϕ1.12 1—ϕ1.18	66	—	双层叠绕10△		90/72	4.79	990	—
Y315M1—10	55	120		91.5	0.76				400				2—ϕ1.30	52	—				6.37	1150	—
Y315M3—10	75	161		92	0.77				455				2—ϕ1.40 2—ϕ1.50	22	—	双层叠绕5△			7.15	1220	—

B-2 Y 系列（IP23）小型三相异步电动机技术数据（380V，50Hz）

表 B-2 Y 系列（IP23）**小型三相异步电动机技术数据**（380V，50Hz）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度	气隙长度	定子外径	定子内径	定子线规/(根－mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 cosφ				/mm										
Y160M—2	15	29	2910	88	0.88	7.0	1.7	2.2	100	0.8	290	160	2—ϕ1.06 1—ϕ1.12	24	7.1	双层叠绕1△	1—14	36/28	8.51
Y160L1—2	18.5	36		89	0.89		1.8		125				1—ϕ1.4 1—ϕ1.5	20	8.0				9.08
Y160L2—2	22	42		89.5	0.89		2.0		135				1—ϕ1.5 1—ϕ1.6	18	12.3				9.57
Y160M—4	11	23	1460	87.5	0.85		1.9		100	0.55		187	1—ϕ1.18	54	7.6	双层叠绕2△	1—11	48/44	7.85
Y160L1—4	15	30		88	0.86		2.0		130				1—ϕ1.3	42	10				8.2
Y160L2—4	18.5	37		89	0.86				150				1—ϕ1.4	18	13.5	双层叠绕1△			9.29
Y160M—6	7.5	17	960	85	0.79	6.5		2.0	95	0.45		205	1—ϕ1.4	32	7.3		1—9	54/44	6.36
Y160L—6	11	25		86.5	0.78				125				2—ϕ1.18	24	10.1				7.57
Y160M—8	5.5	14	720	83.5	0.73	6.0			95				1—ϕ1.3	42	6.9		1—7	54/50	6.34
Y160L—8	7.5	18		85	0.73				125				1—ϕ1.10	32	8.5				6.88
Y180M—2	30	57	2940	89.5	0.89	7.0	1.7	2.2	135	1.0	327	182	2—ϕ1.3	32	15.9	双层叠绕2△	1—14	36/28	12.87
Y180L—2	37	70		90.5	0.89		1.9		160				2—ϕ1.4	27	38				13.26
Y180M—4	22	43	1460	89.5	0.86				135	0.65		210	2—ϕ1.12	36	15.2		1—11	48/44	11.28
Y180L—4	30	58		90.5	0.87				175				2—ϕ1.3	32	19.4				13.15
Y180M—6	15	32	970	88	0.81	6.5	1.8	2.0	125	0.50		230	1—ϕ1.4	44	13.3		1—9	54/44	10.27
Y180L—6	18.5	38		88.5	0.83				155				2—ϕ1.06	36	14.8				10.59

（续）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度	气隙长度	定子外径	定子内径	定子线规/(根－mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数 Q_1/Q_2	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数 cosφ				/mm										
Y180M—8	11	26	720	86.5	0.74	6.0	1.8	2.0	125	0.50	327	230	2—φ0.9	56	12.2	双层叠绕2△	1—7	54/50	9.58
Y180L—8	15	34		87.5	0.76				155				2—φ1.0	44	16				10.34
Y200M—2	45	84	2940	91	0.89	7.0	1.9	2.2	155	1.1	368	210	2—φ1.25 2—φ1.3	24	24.3		1—14	36/28	15.4
Y200L—2	55	103	2950	91.5	0.89				185				3—φ1.4	21	29.9				17.44
Y200M—4	37	71	1470	90.5	0.87		2.0		155	0.7		245	2—φ1.12 2—φ1.18	26	21.3		1—11	48/44	14.73
Y200L—4	45	86		91.5	0.87				185				3—φ1.3	22	23.6				16.82
Y200M—6	22	44	970	89	0.85	6.5	1.7	2.0	135	0.50		260	2—φ1.18	36	16.6		1—9	54/44	12.97
Y200L—6	30	59	980	89.5	0.87				165				1—φ1.3 1—φ1.4	30	17.8				15.46
Y200M—8	18.5	41	730	88.5	0.78	6.0			135				1—φ1.6	44	18.2		1—7	54/50	12.88
Y200L—8	22	48	740	89	0.78		1.8		165				2—φ1.25	36	20.2				14.2
Y225M—2	75	140	2960	91.5	0.89	7.0		2.2	185	1.2	400	225	3—φ1.6	18	38.5		1—14	36/28	20.56
Y225M—4	55	104	1470	91.5	0.88				185	0.8		260	1—φ1.25 1—φ1.3	40	29.2	双层叠绕4△	1—12	48/44	21.56
Y225M—6	37	71	980	90.5	0.87	6.5		2.0	175	0.55		285	1—φ1.18 1—φ1.25	30	19.4	双层叠绕3△		72/58	18.64
Y225M—8	30	63	740	89.5	0.81	6.0	1.7		175				1—φ1.4	50	25.7	双层叠绕4△	1—9		18.16

（续）

型号	额定功率/kW	满载时				堵转电流/额定电流	堵转转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩	铁心长度	气隙长度	定子外径	定子内径	定子线规/(根-mm)	每槽线数	空载电流/A	绕组形式及连接方式	节距	槽数Q_1/Q_2	导线铜重/kg
		定子电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数cosφ				/mm										
Y250S—2	90	167	2960	92	0.89	7.0	1.7	2.2	170	1.5	445	225	2—ϕ1.3 3—ϕ1.4	16	46.4	双层叠绕2△	1—16	42/34	27.11
Y250M—2	110	201		92.5	0.90				195				4—ϕ1.5 1—ϕ1.6	14	—				30.86
Y250S—4	75	141	1470	92	0.88		2.0		185	0.9		300	2—ϕ1.25 3—ϕ1.3	14	38.8		1—14	60/50	24.72
Y250M—4	90	168		92.5	0.88		2.2		215				4—ϕ1.25 2—ϕ1.3	12	47.1				26.42
Y250S—6	45	87	980	91	0.86	6.5	1.8	2.0	165	0.65		325	2—ϕ1.4	28	22.8	双叠3△	1—12	72/58	23.67
Y250M—6	55	106		91	0.87				195				4—ϕ1.06	46	26.2				24.97
Y250S—8	37	78	740	90	0.80	6.0	1.6		165				1—ϕ1.12 1—ϕ1.06	46	32.1	双叠4△	1—9		20.55
Y250M—8	45	94		90.5	0.80		1.8		195				1—ϕ1.25 1—ϕ1.12	38	35.8				22.87
Y280M—2	132	241	2970	92.5	0.90	7.0	1.6	2.2	200	1.6	493	280	6—ϕ1.5	12	—		1—16		32.52
Y280S—4	110	205	1480	92.5	0.88		1.7		200	1.0	493	330	4—ϕ1.25	24	—	双叠2△	1—14	42/34	35.2
Y280M—4	132	245		93	0.88		1.8		240				4—ϕ1.40	20	—	双叠4△		60/50	39.56
Y280S—6	75	143	980	91.5	0.87	6.5	1.8	2.2	185	0.70		360	3—ϕ1.4	22	—	双叠3△	1—12	72/58	30.6
Y280M—6	90	169		92	0.88				240				3—ϕ1.5	18	—				32.28
Y280S—8	55	115	740	91	0.80	6.0			185				1—ϕ1.3 1—ϕ1.4	36	—		1—9		27
Y280M—8	75	154		91.5	0.81				240				1—ϕ1.5 1—ϕ1.6	28	—	双叠4△			31.7

注：本系列IP（23）电动机出厂价格可参考IP（44）系列电动机。

B-3　YR 系列（IP44）小型三相异步电动机技术数据（380V，50Hz）

表 B-3　YR 系列（IP44）绕线转子三相异步电动机绕组及技术数据（380V，50Hz）

型号	额定功率/kW	额定时 转速/(r/min)	额定时 电流/A	额定时 效率(%)	额定时 功率因数	转子 电压/V	转子 电流/A	定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组 每槽匝数	定子绕组 线规/(根-mm)	定子绕组 节距	定子绕组 并联路数	定子绕组 绕组形式	定子绕组 绕组连接	转子绕组 每槽匝数	转子绕组 线规/(根-mm 或 根-mm×mm)	转子绕组 节距	转子绕组 并联路数	转子绕组 绕组形式	转子绕组 绕组连接	最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m²)	电机质量/kg
YR132M1—4	4	1440	9.3	84.5	0.77	230	11.5	36/24	102	1—ϕ0.8	1—9	2	双层叠式	△	28	3—ϕ1.06	1—6	1	双层叠式	Y	3.0	0.0895	80
YR132M2—4	5.5		12.6	86		272	13		74	1—ϕ0.95					24	2—ϕ1.12 1—ϕ1.18						0.1043	95
YR160M—4	7.7	1460	15.7	87.5	0.83	250	19.5		74	1—ϕ1.12					44	2—ϕ1.0 1—ϕ1.06		2				0.2378	130
YR160L—4	11		22.5	89.5		276	25		52	2—ϕ0.95					34	3—ϕ1.18						0.2935	155
YR180L—4	15	1465	30		0.85	278	34		32	2—ϕ1.06	1—11	4			18	3—ϕ1.30	1—9					0.4925	205
YR200L—1—4	18.5		36.7	89	0.86	247	47.5	48/36	64	1—ϕ1.18					16	4—ϕ1.40						0.7998	265
															8	1-2×5.6		1					
YR200L2—4	22		43.2	90		293	47		54	1—ϕ1.30					16	4—ϕ1.40		2				0.8618	290
															8	1-2.24×5.6		1					
YR225M2—4	30	1475	57.6	91	0.87	360	51.5		23	3—ϕ1.25		2			16	6—ϕ1.25		2				1.5785	380
															8	1-2.5×5.6		1					
YR250M1—4	37	1480	71.4	91.5	0.86	289	79		40	2—ϕ1.25	1—12	4			12	8—ϕ1.40		2				2.165	440
															6	2—2×5.6		1					
YR250M2—4	45	1480	85.9	91.5	0.87	340	81		34	3—ϕ1.12	1—12				12	8—ϕ1.40	1—12	2				2.367	490
															6	2-2×5.6		1					

（续）

型号	额定功率/kW	额定时				转子		定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组						转子绕组						最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m^2)	电机质量/kg
		转速/(r/min)	电流/A	效率(%)	功率因数	电压/V	电流/A		每槽匝数	线规/(根-mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接	每槽匝数	线规/(根-mm或根-mm×mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接			
YR280S—4	55	1480	103.8	91.5	0.88	485	70	60/48	26	2—ϕ1.50	1—14	4	双层叠式	△	12	7—ϕ1.40	1—12	2	双层叠式	Y	3.0	4.09	670
															6	2-2×5		1					
YR280M—4	75	1480	140	92.5	0.88	354	128		18	1—ϕ1.40 2—ϕ1.50	1—14	4			12	7—ϕ1.40	1—12	4			3.0	5.043	800
															6	2-2×5		2					
YR132M1—6	3	955	8.2	8.05	0.69	206	9.5	48/36	46	1—ϕ1.0	1—8	1			20	3—ϕ1.0	1—6	1			2.8	0.127	80
YR132M2—6	4		10.7	82		230	11		70	1—ϕ0.80		2			34	2—ϕ0.95		2				0.143	95
YR160M—6	5.5	970	13.4	84.5	0.74	244	14.5		66	1—ϕ1.0					34	2—ϕ1.06						0.3003	135
YR160L—6	7.5		17.9	86		266	18		50	1—ϕ1.18					28	2—ϕ1.18						0.3598	155
YR180L—6	11	975	23.6	87.5	0.81	310	22.5	54/36	38	1—ϕ1.25					28	4—ϕ1.0						0.676	205
YR200L1—6	15		31.8	88.5		198	48		34	1—ϕ1.06 1—ϕ1.12	1—9				16	2—ϕ1.18 4—ϕ1.25						1.0748	280
															8	1-2.24×5.6		1					
YM225M1—6	18.5		38.3	88.5	0.83	187	62.5	54/36	36	1—ϕ1.18 1—ϕ1.25	1—9				16	8—ϕ1.25		2				1.6168	335
															8	1-2.8×6.3		1					

（续）

型号	额定功率/kW	额定时				转子		定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组						转子绕组						最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m²)	电机质量/kg
		转速/(r/min)	电流/A	效率(%)	功率因数	电压/V	电流/A		每槽匝数	线规/(根-mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接	每槽匝数	线规/(根-mm或根-mm×mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接			
YR225M2—6	22	980	45	89.5	0.83	224	61	54/36	30	1—φ1.30 1—φ1.40	1—9	2	双层叠式	△	16 8	8—φ1.25 1-2.8×6.3	1—6	2 1	双层叠式	Y	2.8	1.7675	365
YR250M1—6	30		60.4	90	0.84	282	66	72/48	18	3—φ1.12 1—φ1.18	1—12				12 6	7—φ1.40 2-2.24×5	1—8	2 1				3.0025	450
YR250M2—6	37		73.9	90.5		331	69		16	3—φ1.40					12 6	3—φ1.40 5—φ1.30 2-2.24×5		2 1				3.245	490
YR280S—6	45	985	87.9	91.5	0.85	362	76	72/48	14	3—φ1.40 1—φ1.50	1—12				12 6	3—φ1.30 6—φ1.40 2-2.5×5.6		2 1				5.4475	680
YR280M—6	55		106.9	92		423	80		12	3—φ1.50 1—φ1.60					2 6	9—φ1.40 2-2.5×5.6		2 1				6.0275	730
YR160M—8	4	715	10.7	82.5	0.69	216	12	48/36	92	1—φ0.90	1—6				42	2—φ0.95	1—5	2			2.4	0.2978	135
YR160L—8	5.5		14.2	83	0.71	230	15.5		70	1—φ1.0					34	2—φ1.06						0.3565	155
YR180L—8	7.5	725	18.4	85	0.73	255	19	54/36	28	1—φ1.00 1—φ1.12	1—7	1			34	1—φ1.25 1—φ1.30						0.6238	190

（续）

型号	额定功率/kW	额定时				转子		定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组						转子绕组						最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m^2)	电机质量/kg
		转速/(r/min)	电流/A	效率(%)	功率因数	电压/V	电流/A		每槽匝数	线规/(根-mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接	每槽匝数	线规/(根-mm或根-mm×mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接			
YR200L1—8	11	735	26.6	86	0.73	152	46	54/36	44	2—ϕ0.95	1—7	2	双层叠式	△	16	2—ϕ1.18 4—ϕ1.25	1—5	2	双层叠式	Y	2.4	1.0665	280
															8	1-2.2×5.6		1					
YR225M1—8	15		34.5	88	0.75	169	56		40	2—ϕ1.12					16	8—ϕ1.25		2				1.7458	365
															8	1-2.8×6.3		1					
YR225M2—8	18.5		42.1	89		211	54		32	2—ϕ1.30					16	8—ϕ1.25		2				1.9773	390
															8	1-2.8×6.3		1					
YR250M1—8	22		48.7	88	0.78	210	65.5	72/48	48	1—ϕ1.40	1—9	4			12	7—ϕ1.4	1—6	2				2.96	450
															6	2-2.24×5		1					
YR250M2—8	30		66.1	89.5	0.77	270	69		74	1—ϕ1.12		8			12	7—ϕ1.40		2				3.3275	500
															6	2-2.24×5		1					
YR280S—8	37		78.2	91	0.79	281	81.5		36	3—ϕ1.0		4			12	9—ϕ1.40		2				5.37	680
															6	2-2.5×5.6		1					
YR280M—8	45		92.9	92	0.80	359	76		28	2—ϕ1.4					12	3—ϕ1.30 6—ϕ1.40		2				6.56	800
															6	2-2.5×5.6		1					

注：转子绕组机座号 132~180 为圆铜线，机座号 200~280 为圆铜线与扁铜线两种方案同时并存。

B-4 YR 系列（IP23）小型三相异步电动机技术数据（380V，50Hz）

表 B-4 YR 系列（IP23）**绕线转子三相异步电动机绕组及技术数据**（380V，50Hz）

型号	额定功率/kW	额定时				转子		定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组						转子绕组						最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m^2)	电机质量/kg
		转速/(r/min)	电流/A	效率(%)	功率因数	电压/V	电流/A		每槽匝数	线规/(根－mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接	每槽匝数	线规/(根－mm或根－mm×mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接			
YR160M—4	7.5	1420	16	84	0.84	260	19	48/36	34	1—ϕ1.50	1—11	1	双层叠式	△	18	3—ϕ1.12	1—9	1	双层叠式	Y	2.8	0.09875	
YR160L1—4	11	1435	22.7	86.5	0.85	275	26		50	2—ϕ0.85		2			14	4—ϕ1.12						0.1215	160
YR160L2—4	15	1445	30.8	87		260	37		38	2—ϕ1.0					10	3—ϕ1.30 1—ϕ1.40						0.1493	
YR180M—4	18.5	1425	36.7		0.88	197	61		40	2—ϕ1.12					8	1－1.8×5						0.25	
YR180L—4	22	1435	43.2	88		232	61		34	1—ϕ1.18 1—ϕ1.25					8	1－1.8×5					3.0	0.2725	
YR200M—4	30	1440	58.2	89	0.88	255	76	48/36	62	2—ϕ0.95		4			8	1－2×5.6						0.455	
YR200L—4	37	1450	71.8			316	74		50	2—ϕ1.0					8	1－2×5.6						0.5525	335
YR225M1—4	45	1440	87.3			240	120		24	1—ϕ1.12 3—ϕ1.18	1—12	2			6	2－1.8×4.5					2.5	0.65	
YR225M2—4	55	1450	105.5	90		288	121		40	1—ϕ1.25 1—ϕ1.30		4			6	2－1.8×4.5						0.74	420
YR250S—4	75		141.5	90.5	0.89	449	105	60/48	14	2—ϕ1.25 3—ϕ1.30	1—14	2			6	2－1.6×4.5	1—12				2.6	1.34	
YR250M—4	90	1460	168.8	91		524	107		12	4—ϕ1.25 2—ϕ1.30					6	2－1.6×4.5						1.5	590
YR280S—4	110		205.2	91.5		349	196		24	4—ϕ1.25		4			4	2－2.24×6.3					3.0	2.275	

（续）

型号	额定功率/kW	额定时				转子		定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组						转子绕组						最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m^2)	电机质量/kg
		转速/(r/min)	电流/A	效率(%)	功率因数	电压/V	电流/A		每槽匝数	线规/(根-mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接	每槽匝数	线规/(根-mm或根-mm×mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接			
YR280M—4	132	1460	243.6	92.5	0.89	419	194	60/48	20	4—φ1.40	1—14	4	双层叠式	△	4	2-2.24×6.3	1—12	1	双层叠式	Y	3.0	2.5975	880
YR160M—6	5.5	950	13.2	82.5	0.77	279	13	54/36	36	2—φ0.95	1—9	1			24	1—φ1.18 1—φ1.25	1—6				2.5	0.143	
YR160L—6	7.5		17.5	83.5	0.78	260	19		58	1—φ1.06		2			18	3—φ1.12						0.1638	160
YR180M—6	11	940	25.4	84.5		146	50		46	1—φ1.40					8	1-1.8×4					2.8	0.3125	
YR180L—6	15	950	33.7	85.5	0.79	187	53		36	2—φ1.06					8	1-1.8×4					2.8	0.37	
YR200M—6	18.5		40.1	86.5	0.81		65		36	2—φ1.18					8	1-1.85×5						0.5425	
YR200L—6	22	955	46.6	87.5	0.82	224	63		30	1—φ1.30 1—φ1.40					8	1-1.8×5						0.6375	315
YR255M1—6	30		61.3		0.85	227	86	72/54	38	2—φ1.12	1—12	3			6	2-1.6×4.5	1—9				2.2	0.8093	
YR225M2—6	37	955	74.3	89		287	82		30	1—φ1.18 1—φ1.25					6	2-1.6×4.5						0.934	400
YR250S—6	45		90.4			307	93		28	2—φ1.40					6	2-1.8×4.5						1.6525	
YR250M—6	55	970	108.6	89.5	0.86	359	97		24	4—φ1.06					6	2-1.8×4.5						1.88	575
YR280S—6	75		143.1	90.5	0.88	392	121		22	3—φ1.40					6	2-2×5					2.5	2.88	
YR280M—6	90		168.7	91	0.89	481	118		18	3—φ1.50					6	2-2×5						3.5125	880

（续）

型号	额定功率/kW	额定时				转子		定转子槽数 Q_1/Q_2	定子绕组						转子绕组						最大转矩/额定转矩	转动惯量/(kg·m²)	电机质量/kg
		转速/(r/min)	电流/A	效率(%)	功率因数	电压/V	电流/A		每槽匝数	线规/(根-mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接	每槽匝数	线规/(根-mm或根-mm×mm)	节距	并联路数	绕组形式	绕组连接			
YR160M—8	4	705	10.6	81	0.71	262	11	48/36	54	1—φ1.25	1—6	1	双层叠式	△	30	1—φ1.06 1—φ1.12	1—5	1	双层叠式	Y	2.2	0.1418	160
YR160L—8	5.5		14.4	81.5		243	15		43	1—φ1.40					22	2—φ1.25						0.162	
YR180M—8	7.5	690	19	82	0.73	105	49		70	2—φ0.90		2			8	1-1.8×4						0.309	315
YR180L—8	11	710	27.6	83		140	53		54	2—φ1.0					8	1-1.8×4						0.3675	
YR200M—8	15		36.7	85		153	64		50	2—φ0.95					8	1-1.8×5						0.5355	
YR200L—8	18.5		41.9	86	0.78	187			43	2—φ1.30					8	1-1.8×5						0.63	
YR255M1—8	22	715	49.2	86	0.79	161	90	72/48	62	1—φ1.25	1—9	4			6	2-1.6×4.5	1—6				2.0	0.791	400
YR225M2—8	30	715	66.3	87	0.79	200	97		50	1—φ1.40					6	2-1.6×4.5						0.9053	
YR250S—8	37	720	81.3	87.5		218	110		46	2—φ1.06					6	2-1.8×4.5						1.605	515
Y250M—8	45		97.8	88.5		264	109		38	1—φ1.18 1—φ1.25					6	2-1.8×4.5						1.8325	
YR280S—8	55	725	114.5	89	0.82	279	125		36	1—φ1.30 1—φ1.40					6	2-2×5					2.2	2.6375	850
YR280M—8	75		154.4	90		359	131		28	1—φ1.50 1—φ1.60					6	2-2×5						3.4225	

B-5　YR（IP44）和 YR（IP23）电刷、刷握和集电环尺寸

表 B-5　YR（IP44）**和 YR**（IP23）**电刷、刷握和集电环尺寸**

集电环尺寸/mm				电刷尺寸 $\frac{l}{mm}\times\frac{a}{mm}\times\frac{r}{mm}$	刷握尺寸 $\frac{l}{mm}\times\frac{a}{mm}$	YR(IP44)		YR(IP23)	
外径	内径	环宽	环间距离			中心高	电刷数	中心高	电刷数
80	35	12	15	16×8×32	16×8	132	2	—	—
80	40	12	15	16×8×32	16×8	160	2	160	2
						180			
112	55	15	15	20×10×40	20×10	200	2	180	2
						225		200	
140	65	18	18	32×12.5×40	32×12.5	250	2	225	2
						280			
140	80	18	18	32×12.5×40	32×12.5	—	—	250	2
								280	4

附录 C　单相电动机绕组技术数据

表 C-1　DO2 系列单相电容运转电动机技术数据

电动机型号	额定参数						定子铁心/mm				绕组极数	定/转槽数 Q_1/Q_2	主绕组		副绕组			布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数	外径	内径	长度	气隙			每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm	电容器/(μF/V)	
DO2-4514	6	220	0.20	1400	17	0.80	71	38	45	0.20	4	12/18	700	0.18	675	0.16	1/630	(4—12—2/1—A/B)①
DO2-4524	10		0.26		24	0.80						12/18	600	0.20	620	0.16	1/630	
DO2-5014	16		0.28		33	0.80	80	44	45	0.20		12/18	560	0.21	455	0.21	2/630	
DO2-5024	25		0.36		38	0.82						12/18	436	0.25	435	0.21	2/630	
DO2-5614	40		0.49		45	0.82	90	54	50	0.25		24/18	356	0.28	508	0.23	2/630	(4—24—3/3—A)
DO2-5624	60		0.64		50	0.85						24/18	348	0.31	339	0.28	4/630	
DO2-6314	90		0.94		51	0.85	96	58	45	0.25		24/18	302	0.35	374	0.31	4/630	
DO2-6324	120		1.17		55	0.85			54			24/30	259	0.40	365	0.31	4/630	
DO2-7114	180		1.58		59	0.88	110	67	50	0.25		24/30	206	0.42	330	0.38	6/430	
DO2-7124	250		2.04		62	0.90			62			24/30	165	0.47	268	0.42	8/430	
DO2-4512	10	220	0.20	2800	28	0.80	71	38	45	0.20	2	12/18	868	0.18	971	0.16	1/630	(2—12—3/3—B)
DO2-4522	16		0.26		35	0.80						12/18	750	0.20	796	0.19	1/630	
DO2-5012	25		0.33		40	0.85	80	44	45	0.20		12/18	519	0.25	819	0.23	2/630	
DO2-5022	40		0.42		42	0.90						12/18	489	0.25	698	0.25	2/630	
DO2-5612	60		0.57		53	0.90	90	48	50	0.25		24/18	454	0.28	527	0.31	4/630	(2—24—6/6—B)
DO2-5622	90		0.81		56	0.90						24/18	363	0.33	467	0.31	4/630	
DO2-6312	120		0.91		63	0.95	96	50	45	0.25		24/18	415	0.40	593	0.31	4/630	
DO2-6322	180		1.29		67	0.95			54			24/18	320	0.45	427	0.33	6/630	
DO2-7112	250		1.73		69	0.95	110	58	50	0.25		24/18	271	0.50	382	0.45	8/630	

① 4—12—2/1—A/B 含义：4—极数；12—定子槽数；2/1—主/副绕组每极线圈数；A/B—主/副绕组。以下布线形式说明类同。

表 C-2　DO 系列单相电容运转电动机技术数据

电动机型号	额定参数						定子铁心/mm				绕组极数	定/转槽数 Q_1/Q_2	主绕组		副绕组			布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数	外径	内径	长度	气隙			每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm	电容器/(μF)	
DO-4514	8	220	0.20	1400	23	0.80	71	38	45	0.20	4	12/15	575	0.20	650	0.16	1	(4—12—2/1—A/B)
DO-4524	15		0.28		30	0.80						12/15	523	0.21	670	0.17	1	
DO-5014	25		0.35		35	0.82	80	42	34	0.15		12/15	504	0.25	523	0.18	2	
DO-5024	40		0.52		40	0.82			44			12/15	373	0.27	598	0.20	2	
DO-5614	60		0.72		45	0.84	90	52	38	0.20		24/18	350	0.29	460	0.27	4	(4—24—3/3—A)
DO-5624	90		0.97		49	0.84			48			24/18	260	0.31	420	0.29	4	
DO-6314	120		1.20		53	0.86	102	60	44	0.25		24/22	265	0.38	460	0.29	4	
DO-6324	180		1.67		57	0.86			55			24/22	213	0.44	355	0.33	6	
DO-4512	15	220	0.23	2800	36	0.82	71	38	45	0.20	2	12/15	823	0.23	1258	0.23	1	(2—12—3/3—B)
DO-4522	25		0.32		42	0.84						12/15	698	0.25	1369	0.25	1	
DO-5012	40		0.45		48	0.84	80	43	35	0.25		12/15	700	0.25	920	0.25	2	
DO-5022	60		0.55		53	0.86			46			12/15	550	0.29	778	0.29	2	
DO-5612	90		0.82		58	0.86	90	48	38	0.25		24/18	500	0.33	650	0.33	4	(2—24—6/6—B)
DO-5622	120		1.00		62	0.88			48			24/18	400	0.41	640	0.41	4	
DO-6312	180		1.42		65	0.88	102	54	44	0.25		24/18	341	0.44	510	0.44	6	

表 C-3　CO2 系列单相电容起动电动机技术数据

电动机型号	额定参数						定子铁心/mm				绕组极数	定/转槽数 Q_1/Q_2	主绕组		副绕组			布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数	外径	内径	长度	气隙			每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm	电容器/μF	
CO2-7114	120	220	1. 88	1400	50	0. 58	110	67	50	0. 25	4	24/30	224	0. 53	145	0. 35	75	(4—24—3/2—A)
CO2-7124	180		2. 49		53	0. 62			62				183	0. 60	124	0. 38		
CO2-8014	250		3. 11		58	0. 63	128	77	58	0. 25		24/30	158	0. 71	133	0. 47	100	(4—24—3/2—A)
CO2-8024	370		4. 24		62	0. 64			75				124	0. 85	134	0. 50		
CO2-9014	550		5. 57		65	0. 69	145	87	70	0. 25		36/42	127	0. 95	108	0. 60	150	(4—36—4/3—B/A)
CO2-9024	750		6. 77		69	0. 73			90				96	1. 06	120	0. 63		
CO2-7112	180	220	1. 89	2800	60	0. 72	110	58	50	0. 25	2	24/18	297	0. 56	247	0. 38	75	(2—24—6/4—B)
CO2-7122	250		2. 40		64	0. 74			62				235	0. 63	204	0. 47		
CO2-8012	370		3. 36		65	0. 77	128	67	58	0. 25		24/18	206	0. 71	206	0. 53	100	(2—24—6/4—B)
CO2-8022	550		4. 65		68	0. 79			75				159	0. 85	154	0. 56	150	
CO2-9012	750		5. 94		70	0. 82	145	77	70	0. 30		24/18	147	1. 00	133	0. 63	200	

注：起动电容器采用 CDJ 型电解电容器，工作电压为 250V。

表 C-4　CO 系列单相电容起动电动机技术数据

电动机型号	额定参数						定子铁心/mm				绕组极数	定/转槽数 Q_1/Q_2	主绕组		副绕组			布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数	外径	内径	长度	气隙			每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm	电容器/μF/V	
CO-6324	120	220	1.95	1400	48	0.59	102	58	60	0.20	4	24/30	231	0.57	102	0.35	100/220	(4—24—3/3—A)
CO-6334	180		2.60		52	0.60			70			24/22	200	0.57	114	0.41		
CO-7104	180		2.44		56	0.60	120	71	48	0.20		24/22	209	0.64	128	0.41	100/220	(4—24—3/3—A) (4—36—4/3—B/A)
CO-7114	250		3.05		60	0.62			62				167	0.72	149	0.47		
CO-7124	370		4.17		63	0.64	138	81.6	80	0.25		24/26	126	0.83	131	0.49	200/220	
CO-8014	550		5.65		—	—			70				120	0.96	113	0.55	150/220	
CO-8024	750		7.05		—	—			90				93	1.08	92	0.59		
CO-6322	180	220	1.95	2800	60	0.70	102	52	52	0.20	2	24/18	301	0.57	273	0.41	75/220	(2—24—5/5—B)
CO-6332	250		2.25		63	0.72			68				232	0.62	200	0.44	100/220	
CO-7102	250		2.50		63	0.72	120	62	48	0.25		24/18	261	0.62	191	0.47	100/220	
CO-7112	370		3.50		65	0.74			62				212	0.72	182	0.49	100/220	
CO-7122	550		4.84		68	0.76			80				153	0.86	185	0.53	150/220	
CO-8012	750		6.25		—	—	138	71.6	70	0.30		24/30	149	1.00	185	0.55	150/220	

表 C-5　BO2 系列单相分相起动电动机技术数据

电动机型号	额定参数						定子铁心/mm				绕组极数	定/转槽数 Q_1/Q_2	主绕组		副绕组		堵转转矩倍数	最大转矩倍数	布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数	外径	内径	长度	气隙			每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm			
BO2-6314	60	220	1. 23	1400	39	0. 57	96	58	45	0. 25	4	24/30	315	0. 42	127	0. 31	1. 7	1. 8	(4—24—3/3—A)
BO2-6324	90		1. 64		43	0. 58			54				270	0. 45	117	0. 35	1. 5	1. 8	
BO2-7114	120		1. 88		50	0. 58	110	67	50				224	0. 53	124	0. 33	1. 5	1. 8	
BO2-7124	180		2. 49		53	0. 62			62				183	0. 60	102	0. 35	1. 4	1. 8	
BO2-8014	250		3. 11		58	0. 63	128	77	58				158	0. 71	104	0. 40	1. 2	1. 8	
BO2-8024	370		4. 24		62	0. 64			75				124	0. 85	89	0. 47	1. 2	1. 8	
BO2-6312	90	220	1. 02	2800	56	0. 67	96	50	45	0. 25	2	24/18	436	0. 45	192	0. 33	1. 5	1. 8	(2—24—6/6—B)
BO2-6322	120		1. 36		58	0. 69			54				357	0. 50	182	0. 35	1. 4	1. 8	
BO2-7112	180		1. 89		60	0. 72	110	58	50				297	0. 56	167	0. 38	1. 3	1. 8	
BO2-7122	250		2. 40		64	0. 74			62				235	0. 63	156	0. 40	1. 1	1. 8	
BO2-8012	370		3. 36		65	0. 77	128	67	58				206	0. 71	136	0. 45	1. 1	1. 8	

表 C-6　BO 系列单相分相起动电动机技术数据

电动机型号	额定参数						起动电流/A	起动转矩倍数	最大转矩倍数	定子铁心/mm				绕组极数	定/转槽数 Q_1/Q_2	主绕组		副绕组		布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	转速/(r/min)	效率(%)	功率因数				外径	内径	长度	气隙			每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm	
BO-5614	40	220	1.05	1400	32	0.54	7.0	1.9	1.8	90	52	40	0.20	4	24/22	374	0.38	150	0.27	(4—24—3/3—A)
BO-5624	60		1.19		38	0.60	8.2	1.8	1.8			48				321	0.41	127	0.29	
BO-6314	90		1.60		44	0.58	10	1.8	1.8	102	58	48				288	0.53	128	0.31	
BO-6324	120		1.85		50	0.59	11.6	1.6	1.8			56				248	0.57	109(−52)	0.33	
BO-6334	180		2.60		52	0.60	17	—	1.8	102	60	68				180	0.62	86	0.41	
BO-7104	180		2.44		56	0.60	16	1.6	1.8			48				209	0.64	89	0.38	
BO-7114	250		3.05		60	0.62	21	1.6	1.8	120	71	62				165	0.72	95	0.41	
BO-7124	370		4.17		63	0.64	28	1.4	1.8			80				126	0.83	71	0.44	
BO-5612	60	220	1.01	2800	42	0.64	8.0	2.0	1.8	90	48	40	0.25	2	24/18	560	0.41	229	0.31	(2—24—6/6—B)
BO-5622	90		1.19		52	0.66	11	1.9	1.8			48				473	0.47	179	0.35	
BO-6312	120		1.43		56	0.68	12	1.8	1.8	102	52	48				406	0.53	203	0.35	
BO-6322	180		1.95		60	0.70	15	1.5	1.8			56				352	0.59	174	0.38	
BO-6322	250		2.50		63	0.72	22	—	1.8	102	54	62				247	0.62	127(−80)	0.44	
BO-7102	250		2.50		63	0.72	19	1.2	1.8	120	62	48				260	0.62	159	0.38	
BO-7112	370		3.50		65	0.74	24	1.2	1.8			62				212	0.72	124	0.44	

表 C-7　JZ 系列单相分相起动电动机技术数据表

电动机型号	额定参数			定子铁心/mm				绕组极数	定子槽数 Q_1	转子槽数 Q_2	主绕组		副绕组		布线形式
	功率/W	电压/V	电流/A	外径	内径	长度	气隙				每极匝数	线径/mm	每极匝数	线径/mm	
JZ-5614	40	220	1.0	90	52	40	0.20	4	24	22	374	0.38	150	0.27	(4—24—3/3—A)
JZ-5624	60		1.5			48					321	0.41	127	0.29	
JZ-6314	90		2.0	102	58	48					285	0.53	128	0.31	(4—24—3/3—A)①
JZ-6324	120		2.0			56					238	0.57	119	0.33	
JZ-7114	180		2.5	102	52	48					209	0.64	89	0.38	(4—24—3/3—A)
JZ-7124	250		3.5	120	71	62					165	0.72	95	0.41	
JZ-7134	370		4.5			80					126	0.83	71	0.44	
JZ-5612	60	220	1.0	90	48	40	0.25	2	24	18	562	0.41	229	0.31	(2—24—6/6—B)
JZ-5622	90		1.2			48					465	0.47	179	0.35	
JZ-6312	120		2.0	102	52	48					407	0.53	213	0.35	
JZ-6322	180		2.5			56					352	0.59	174	0.38	
JZ-7112	250		3.0	120	62	48					260	0.62	159	0.38	
JZ-7122	370		4.0			62					212	0.72	124	0.44	

①　该型号电动机绕组布线形式也有用4—24—3/3—A。

表 C-8　台扇、壁扇、顶扇、落地扇等用单相电容运转电动机技术数据

电扇规格/mm	电动机参数			定子铁心/mm				定、转槽数 Q_1/Q_2	线圈节距	主绕组		副绕组		调速绕组	调速方法	绕组布接线形式
	功率/W	电压/V	极数	外径	内径	叠厚	气隙			线径/mm	线圈匝数×线圈数	线径/mm	线圈匝数×线圈数	线圈数×线圈匝数		
				78	44.5			16/22	1—4	0.15	1050×4	0.15	1050×4	4×550	抽头	L—2 型 16 槽 4—4/2—4/2 三速
250	31	220	4	88	44.7	20	0.35	8/17	1—3	0.17	935×4	0.15	1020×4	—	电抗	单速 8 槽双层绕组
				88	44.7			8/17	1—3	0.17	850×4	0.15	1020×2	2(150+250)	抽头	L—2 型 8 槽 4—2/3—4/3 三速
	44			73	40.3	26.5	0.35	16/22	1—4	0.15	840×4	0.15	900×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
	44			78	44.5	22	0.35	16/22	1—4	0.17	800×4	0.15	1000×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
	—			82	44.6	24	0.35	16/22	1—4	0.17	800×4	0.15	(1000+500)×2	2×500	抽头	L—2 型 16 槽 4—2(2/2)—2/2 三速
300	—	220	4	88	44.7	26	0.35	8/17	1—3	0.17	634×4	0.19	620×4	—	电抗	单速 8 槽双层绕组
	—			88	44.5	24	0.35	16/22	1—4	0.17	800×4	0.15	500×4	4×500	抽头	L—2 型 16 槽 4—4/2—4/2 三速
	42			80	44.5	26	0.30	16/22	1—4	0.19	880×4	0.15	960×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
	45			88	49	22	0.35	16/22	1—4	0.17	800×4	0.15	1000×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
	50			78	44.5	25	0.35	16/22	1—4	0.17	750×4	0.15	600×4	4×500	抽头	L—2 型 16 槽 4—4/2—4/2 三速
	52			88	44.7	26	0.35	8/17	1—3	0.21	590×4	0.19	780×4	—	电抗	单速 8 槽双层绕组
	—			88.5	49	34	0.35	16/22	1—4	0.19	685×4	0.15	550×4	4(150+270)	抽头	L—2 型 16 槽 4—4/3—8/3 三速
350		220	4													
	—			88.5	49	25	0.35	16/22	1—4	0.21	720×4	0.17	720×2	2(250+470)	抽头	L—2 型 16 槽 4—2—4/2 三速
	54			88.5	49	25	0.35	16/22	1—4	0.19	(650+110)×4	0.17	480×4	2×540	抽头	T—1W 型 16 槽 2(2/2)—4—2/2 双速
	60			88.5	49	35	0.35	16/22	1—4	0.23	570×4	0.19	720×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组

（续）

电扇规格/mm	电动机参数			定子铁心/mm				定、转槽数 Q_1/Q_2	线圈节距	主绕组		副绕组		调速绕组	调速方法	绕组布接线形式
	功率/W	电压/V	极数	外径	内径	叠厚	气隙			线径/mm	线圈匝数×线圈数	线径/mm	线圈匝数×线圈数	线圈数×线圈匝数		
	—			88	44.7	26	0.35	8/17	1—3	0.23	580×4	0.19	930×2	2×730 —	抽头	L—2 型 8 槽 4/2—2/2—2/2 双速
	61			88	44.7	32	0.35	8/17	1—3	0.23	530×4	0.17	890×4	2×350	电抗	单速 8 槽双层绕组
400	61	220	4	88.4	49	32	0.35	16/22	1—4	0.21	550×4	0.19	850×2	2×560	抽头	L—2 型 16 槽 4—2—2 双速
	—			88	44.7	32	0.35	8/17	1—3	0.23	520×2	0.17	1000×2	(0.19)	抽头	L—2 型 8 槽 4—2/2—2/2 双速
	—			88.4	49	32	0.32	16/22	1—4	0.21	550×4	0.19	350×4	4×350	抽头	L—2 型 16 槽 4—4/2—4/2 三速
				88	49	35	0.35	16/22	1—4	0.23	570×4	0.19	720×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
				88	44.7	26	0.35	8/17	1—3	0.23	580×4	0.21	730×4	—	电抗	单速 8 槽双层绕组
				88.5	46.7	32	—	16/22	1—4	0.17	600×4	0.17	650×2	2(420+200)	抽头	L—2 型 16 槽 4—2—4/2 三速
				88.5	49	34	0.35	16/22	1—4	0.19	685×4	0.16	976×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
400		220	4	88.5	46.7	35	—	16/22	1—4	0.19	570×4	0.17	850×2	2(700+160)	抽头	L—2 型 16 槽 4—2—4/2 三速
				88.5	49	35	—	16/22	1—4	0.23	570×4	0.19	1000×2	2×560	抽头	L—2 型 16 槽 4—2—2 双速
				88.5	49	32	—	16/22	1—4	0.23	550×4	0.19	620×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
				88.5	49	35	—	16/22	1—4	0.21	730×4	0.17	930×4	—	电抗	单速 16 槽单层绕组
				96	50	35	—	8/17	1—3	0.23	775×4	0.20	(320+480)2	2(480+320)	抽头	L—2 型 8 槽 4—4/4—4/4 三速

注：1. 电扇的重绕修理要按原始数据进行，无绕组数据者可根据实测铁心尺寸选取相应参数重绕线圈。

2. 除个别规格注明外，抽头调速绕组的导线与副绕组线径相同。

表 C-9　单相罩极式台扇电动机技术数据

电扇规格/mm	额定功率/W	额定电压/V	极数	定子铁心/mm				转子槽数	定子绕组				调速方法
				外径	内径	叠厚	气隙		线径/mm	每极匝数	线圈数	绕组形式	
200	32	220	2	59	28	32	0.35	15	0.19	800+500	2	集中式	定子绕组抽头调速
200	—		2	60	30	25		15	0.17	1270	2	集中式	外串电抗器调速
300	52		4	88	44.7	32		17	0.27	510	4	集中式	外串电抗器调速
400	80		4	108/95.7	51	32		22	0.47	450	4	集中式	外串电抗器调速

表 C-10　外转子式（220V）吊扇电容运转电动机技术数据

序号	吊扇规格/mm	电动机极数	定子铁心/mm				槽数 Q_1/Q_2	主绕组			副绕组			线圈节距	电容器		绕组形式
			外径	内径	叠厚	气隙		线径/mm	线圈匝数	主线圈数	线径/mm	线圈匝数	副线圈数		容量/μF	耐压/V	
1	900	14	118	20	23	0.25	28/45	0.23	764	7	0.19	1012	7	1—3	1.0	400	单层链式
2	900	14	118	23	23	0.25	28/45	0.23	382	14	0.19	506	14	1—3	1.0	—	双层链式
3	900	14	122.3	44	26	—	28/47	0.29	360	14	0.29	360	14	1—3	2.5	400	双层链式
4	1050	14	122.3	44	26	—	28/47	0.30	300	14	0.30	330	14	1—3	3.0	400	双层链式
5	1050	14	118	20	23	—	28/47	0.21	650	7	0.19	870	7	1—3	3.0	400	单层链式
6	1050	14	—	—	—	—	28/—	0.22	860	14	0.20	350	7	1—3	—	—	深槽式
7	1200	16	132	22	24		32/57	0.28	530	8	0.23	780	8	1—3	2.0	400	单层链式
8	1200	16	138.7	25	22	—	32/51	0.23	550	8	0.19	720	8	1—3	2	400	单层链式
9	1200	18	134.8	70.5	25	0.25	36/48	0.27	280	18	0.25	328	18	1—3	2	400	双层链式
10	1400	16	139	20	25	—	32/—	0.29	490	8	0.25	630	8	1—3	2.5	400	单层链式
11	1400	18	138.8	28	28	0.25	36/48	0.29	236	18	0.25	323	18	1—3	4	—	双层链式
12	1400	18	138.8	60	28	0.25	36/48	0.31	200	18	0.31	225	18	1—3	4	400	双层链式
13	1400	18	136.6	63.5	32	0.30	36/48	0.31	440	18	0.25	620	18	1—3	2.4	400	双层链式

表 C-11　单相罩极式电鼓风 2 极电动机绕组技术数据

序号	槽数	额定参数			定子铁心/mm			主绕组				罩极绕组				布线形式
		功率/W	电压/V	电流/A	外径	内径	长度	线径/mm	线圈匝数	线圈节距	每极圈数	线径/mm	每圈匝数	每极圈数	线圈节距	
1	16	220	220	1.5	130	68	62	0.44	140	1—8 2—7 3—6	3	1.82	2	1	16—5　13—8	同心绕组 3/1 布线
2	16	92		0.65	100	48	38	0.31	100	1—5	4	0.93	3	2	16—5　14—9 1—6　13—8	单叠绕组 4/2 布线
3	18	184		2.4	120	63	55	0.66	93	1—9 2—8 3—7	3	0.72	10	2	18—5　15—10 1—6　14—9	同心绕组 3/2 布线
4	20	184		2.4	120	63	55	0.66	76	1—6	5	1.21	3	2	20—6　17—11 1—7　16—10	单叠绕组 5/2 布线
5	24	368		3.5	135	76	55	0.62	—	1—8	5	1.85	2	2	6—14　3—19 7—15　2—18	单叠绕组 5/2 布线
6	24	200		1.2	100	60	50	0.51	78	1—8	5	1.20	5	1	—	—
7	24	249		3.0	86	55	24	0.67	—	1—8	5	1.48	2	2	24—6　19—13 1—7　18—12	单叠绕组 5/2 布线
8	24	270		3.0	105	75	54	0.69	80	1—8	5	1.88	3	2	6—13　2—19 7—14　1—18	单叠绕组 5/2 布线
9	24	368		3.0	140	75	50	0.62	—	1—9	5	1.86	2	2	3—13　2—16 4—14　1—15	单双层绕组 5/2 布线
10	24	368		3.5	140	76	55	0.62	—	1—9	5	1.82	2	2	4—15　2—17 5—14　3—16	单双层绕组 5/2 布线
11	24	200		2.5	120	66	45	0.62	70	1—8	6	1.35	3	2	24—8　21—13 1—9　20—12	单双层绕组 6/2 布线
12	24	368		3.5	135	76	55	0.62	—	1—8	6	1.75	2	2	6—13　1—18 7—14　2—19	单双层绕组 6/2 布线

附录 D　电动机重绕修理常用材料

表 D-1　高强度（QZ、QQ、QY、QXY、QQS）漆包圆铜线数据

铜线直径 /mm	绝缘外径 /mm	铜线截面积 /mm²	20℃导线电阻 /(Ω/km)	重量 /(kg/km)
0. 15	0. 190	0. 0177	993	0. 167
0. 16	0. 200	0. 0201	872	0. 189
0. 17	0. 208	0. 0227	773	0. 210
0. 18	0. 220	0. 0255	689	0. 237
0. 19	0. 230	0. 0284	618	0. 264
0. 20	0. 240	0. 0314	558	0. 292
0. 21	0. 250	0. 0346	506	0. 321
0. 23	0. 280	0. 0415	422	0. 386
0. 25	0. 300	0. 0491	357	0. 454
0. 27	0. 320	0. 0573	306	0. 529
0. 29	0. 340	0. 0661	265	0. 608
0. 31	0. 360	0. 0755	232	0. 693
0. 33	0. 380	0. 0855	205	0. 784
0. 35	0. 410	0. 0962	182	0. 884
0. 38	0. 440	0. 1134	155	1. 04
0. 41	0. 470	0. 1320	133	1. 21
0. 44	0. 500	0. 1521	115	1. 39
0. 47	0. 530	0. 1735	101	1. 58
0. 49	0. 550	0. 1886	93. 0	1. 72
0. 51	0. 580	0. 2043	85. 9	1. 84
0. 53	0. 600	0. 221	79. 5	2. 02
0. 55	0. 620	0. 238	73. 7	2. 17
0. 57	0. 640	0. 255	68. 7	2. 34
0. 59	0. 660	0. 273	64. 1	2. 50
0. 62	0. 690	0. 302	58. 0	2. 76
0. 64	0. 72	0. 322	54. 5	2. 94
0. 67	0. 75	0. 353	49. 7	3. 21
0. 69	0. 77	0. 374	46. 9	3. 41
0. 72	0. 80	0. 401	43. 0	3. 70
0. 74	0. 83	0. 430	40. 7	3. 92
0. 77	0. 86	0. 466	37. 6	4. 24
0. 80	0. 89	0. 503	34. 8	4. 58

（续）

铜线直径 /mm	绝缘外径 /mm	铜线截面积 /mm^2	20℃导线电阻 /（Ω/km）	重量 /（kg/km）
0. 83	0. 92	0. 541	32. 4	4. 92
0. 86	0. 95	0. 581	30. 1	5. 27
0. 90	0. 99	0. 636	27. 5	5. 78
0. 93	1. 02	0. 679	25. 8	6. 16
0. 96	1. 05	0. 724	24. 2	6. 56
1. 00	1. 11	0. 785	22. 4	7. 14
1. 04	1. 15	0. 850	20. 6	7. 72
1. 08	1. 19	0. 916	19. 1	8. 32
1. 12	1. 23	0. 985	17. 8	8. 94
1. 16	1. 27	1. 057	16. 6	9. 59
1. 20	1. 31	1. 131	15. 5	10. 4
1. 25	1. 36	1. 227	14. 3	11. 2
1. 30	1. 41	1. 327	13. 2	12. 1
1. 35	1. 46	1. 431	12. 3	13. 0
1. 40	1. 51	1. 539	11. 3	14. 0
1. 45	1. 56	1. 651	10. 6	15. 0
1. 50	1. 61	1. 767	9. 93	16. 0
1. 56	1. 67	1. 911	9. 17	17. 3
1. 62	1. 73	2. 06	8. 50	18. 6
1. 68	1. 79	2. 22	7. 91	20. 0
1. 74	1. 85	2. 38	7. 37	21. 4
1. 81	1. 93	2. 57	6. 81	23. 3
1. 86	2. 00	2. 78	6. 31	25. 2

ISBN 978-7-111-31815-6
策划编辑：林春泉
封面设计：路恩中



上架指导：工业技术／电工技术

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者服务部：(010)68993821

邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

定价：39.00元

ISBN 978-7-111-31815-6
9 787111 318156 >